

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАИ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС»

Волков Н.Г., ведущий инженер

Соколов И.С., инженер-геолог

В докладе рассматривается методика испытания мерзлого грунта для определения предела длительной прочности в полевых условиях при помощи зонда для статического зондирования. Приводится описание серии специальных поинтервальных испытаний мерзлого грунта на опытной площадке и разобрана методика определения предела длительной прочности грунтов. Также на основе полученных замеров выполнен расчет несущей способности забивной сваи и проведено сравнение полученных результатов с материалами натурных испытаний сваи статической вдавливающей нагрузкой.

Теоретические основы метода.

Основной задачей реологии является изучение закономерностей напряженно-деформированного состояния тел и его изменения во времени. Мерзлый грунт представляет собой систему компонентов, которая имеет тенденцию к проявлению свойств вязко-пластического течения. Содержание в мерзлом грунте незамерзшей воды и льда обуславливает проявление реологических свойств [1].

Для решения задач, связанных с проектированием и прогнозом устойчивости оснований сооружений, устроенных на мерзлых грунтах, с точки зрения реологии, используются характеристики длительного разрушения, включая понятие длительной прочности. Под длительной прочностью подразумевается напряжение, до превышения которого разрушения не наступает, в то время как при его превышении развивается прогрессирующая ползучесть, приводящая к разрушению.

Для мерзлых грунтов по данным С.С. Вялова [1] длительная прочность в 5—15 раз меньше сопротивления быстрому разрушению, или условно-мгновенной прочности. Различают следующие значения прочности: 1) условно-мгновенную прочность, т. е. наибольшую прочность, характеризующую сопротивление материала быстрому разрушению,

2) длительную прочность, определяемую напряжением, которое вызывает разрушение материала за заданный промежуток времени, 3) предел длительной прочности, соответствующий напряжению, до превышения которого деформация имеет затухающий характер и разрушение не происходит при любом практически наблюдаемом времени воздействия нагрузки.

Для проектирования фундаментов и оснований на мерзлых грунтах одними из ключевых параметров длительной прочности мерзлого грунта являются длительная прочность на сжатие (в частности, длительное сопротивление грунта под нижним концом сваи и др.) и длительная прочность на сдвиг по поверхности смерзания (в частности, длительное сопротивление грунта сдвигу по боковой поверхности сваи).

Для оценки длительной прочности существуют два подхода. В первом измеряется деформация грунта от приложенной нагрузки для описания процесса ползучести, или изменения деформации во времени. Во втором измеряется напряжение в грунте, вызванное приложенной нагрузкой, для описания процесса релаксации. Релаксацией напряжения называют уменьшение во времени напряжения в грунтах, необходимого для поддержания постоянной деформации [5].

Релаксация является следствием перераспределения упругой и пластической деформаций. Рассмотрим более подробно второй подход.

Методика испытания.

В практике статического зондирования грунтов существуют два подхода при выполнении испытаний, отличающихся способом задавливания зонда. В первом проводится непрерывное задавливание зонда в грунт с постоянной скоростью, равной 2 см/сек и принятой как стандарт во всем мире. Подробно методика испытания описана в отечественных [2,3], зарубежных [8] и международных [9] стандартах. Во втором подходе проводится прерывистое задавливание зонда в грунт. Зонд также погружается в грунт с постоянной скоростью, однако перерывы осуществляются на заранее заданной глубине, где выполняется испытание грунтов зондированием по специальным методикам. В перерывах задавливания давление масла не сбрасывается для поддержания наконечника зонда строго на постоянной глубине. Каждый перерыв соответствует отдельному испытанию на заданной глубине, где осуществляется запись данных во времени, таких как лобовое сопротивление и боковое трение, а также других дополнительных датчиков зонда, измеряющих поровое давление, температуру и др. В зарубежной практике прерывистое задавливание широко используется для оценки коэффициента фильтрации грунта, где измеряется диссипация (рассеивание) избыточного порового давления, вызванного пенетрацией зонда. Подробно методика измерения описана в [8].

В отечественной практике прерывистое задавливание использовалось с конца 60-х годов при работе установкой С-832М [7], а метод назывался зондирование со «стабилизацией». Впервые методика испытания зондированием со «стабилизацией» на мерзлых грунтах применена БашНИИстрой в 1983 году на опытной площадке в г. Воркута. [4,6].

Установка С-832М или ее аналоги [6,7] оснащены специальным воздушным демпфером, в который подается масло, и находящийся в ней воздух сжимается. Это было выполнено для снижения чувствительности гидросистемы к утечкам масла и для лучшего контроля плавности задавливания штанг.

Последнее было продиктовано сложностью контроля низких скоростей в начале задавливания или прохождения слоев, потенциально опасных для слома колонны штанг. Важно отметить, что вдавливание зонда при зондировании «со стабилизацией» с помощью установки С-832М или ее аналогов происходит только под действием воздушного демпфера и сопровождается снижением скорости вдавливания до нуля.

Современные установки статического зондирования, включая все установки Фугро, воздушным демпфером не оснащаются. Конструкция гидравлической задавливающей системы без устройств демпфирования подачи рабочей жидкости позволяет жестко фиксировать положение зонда статического зондирования в грунте на заданной глубине, тем самым выполняется условие испытания мерзлых грунтов динамометрическим методом [1], описанным Вяловым С.С., в отличии от установки С-832М и её аналогов.

Что касается возможности плавного задавливания штанг, эта трудность решена путем усовершенствования устройства подачи масла в гидравлическую систему и установкой автоматизированного электронного счетчика скорости погружения штанг, подключенного к интерактивной системе считывания данных, которая позволяет оператору статического зондирования видеть скорость погружения зонда, как водитель автомобиля видит скорость движения машины в реальном времени.

Согласно п. 3.7 РСН-33-70 [7] испытание грунтов в режиме релаксации напряжения должно продолжаться до момента, когда будет выполнено условие неизменности показаний датчиков лобового сопротивления и трения по боковой поверхности в течение 2 минут. Однако в настоящее время точность записи показаний и частота опроса датчиков выросли на несколько порядков, поэтому следует варьировать время проведения испытания в зависимости от вида грунта, ориентируясь на фактические данные, передаваемые зондом. Как описывалось выше, для льда время проявления реологических свойств составляет 102-103 секунд, в свою очередь для минерального скелета грунта эта величина больше на несколько порядков, справедливо установить время проведения испытания в интервале времени сопоставимым с сотнями секунд.

В соответствии с рекомендациями Исаева О.Н. [6] после завершения измерений релаксации напряжения в грунте следует продолжать вдавливание без снятия нагрузки с зонда, другими словами перехват следующей штанги осуществляется в момент нахождения зонда уже ниже глубины испытания на релаксацию напряжения. Глубина, на которую задавливается зонд после завершения релаксационного испытания, должна составлять не менее 10 см. Также при проведении замеров температуры с помощью зонда необходимо зафиксировать стабильную отрицательную температуру датчика. В этом случае считается выполненным условие вмерзания зонда в грунт и представляется возможным замерить величину смерзания муфты зонда с грунтом, при срыве муфты в начале «додавливания» последних 10 см.

Методика обработки результатов.

Базовым принципом, который закладывается в обработку полученных данных, является утверждение о том, что геотехническая задача, решаемая методикой измерения релаксации напряжений в мерзлом грунте, это оценка их долговечности. Долговечность и длительная прочность – это параметры сопротивляемости материала разрушению при длительном воздействии нагрузки.

Вялов С.С. предложил использовать динамометрический прибор для проведения испытаний грунтов для определения длительной прочности [1]. Конструкция прибора предусматривает передачу нагрузки на образец грунта через динамометр с фиксацией его положения. Таким образом, достигается развитие деформации ползучести в образце, в результате чего происходит падение напряжения в динамометре, другими словами релаксация напряжений в образце грунта, которую можно физически измерить. Принципиальная схема динамометрического метода реализована в релаксационном испытании грунта методом статического зондирования со стабилизацией [4]. В процессе движения зонда грунту сообщается нагрузка, превышающая величину мгновенной прочности, но при остановке движения зонд фиксируется и ведется запись релаксации напряжений. Запись значений производится до момента, когда наступит стабилизация величины считываемых параметров. После чего полученные данные обрабатываются раздельно по

датчикам лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности с применением уравнений длительной прочности, основанных на логарифмическом уравнении ядра релаксации. Для данных полученных с помощью датчика лобового сопротивления – это параметр соответствующий длительной прочности на сжатие, а для данных полученных с помощью датчика бокового трения – это параметр соответствующий длительной прочности на сдвиг.

Логарифмическое уравнение длительной прочности:

$$\tau = \frac{\beta}{\ln \frac{t_p + 1}{T}} \quad (1)$$

где τ – замеряемое напряжение (лобовое сопротивление или боковое трение), МПа; t_p – время замера, с; β , T – коэффициенты, зависящие от характера релаксации напряжения.

Применение обработки полученных в полевых условиях кривых релаксации напряжений с помощью описанного уравнения позволяет получить значения длительной прочности грунта на заданной глубине. Обоснованность применения этих уравнений подтверждается работами Вялова С.С. [2] при испытании грунтов динамометрическим методом, а также работами Исаева О.Н. [4], который впервые применил логарифмическое уравнение длительной прочности к обработке лобового сопротивления, записанного в ходе испытаний в «релаксационно-ползучем» режиме.

Полевые испытания и результаты обработки данных.

Испытание грунтов статическим зондированием было выполнено на строительной площадке г. Салехард, где распространены многолетнемерзлые грунты. Графики записи величин лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности в процессе движения зонда представлены на рис. 1. Замеры температуры мерзлых грунтов проводились с помощью статического зондирования по уже отработанной методике авторами [11,12,13] и подтвердили наличие мерзлых грунтов на исследуемой площадке. Зондирование было выполнено до глубины 16.0 м ниже дневной поверхности с замерами температуры и релаксации напряжения через 1 м.

Испытания проводились 6 марта 2018 года. На момент проведения испытаний глубина промерзания составила 1.7 м. Ниже, с глубины 3.0 м залегают многолетнемерзлые грунты. Измеренные температуры в толще мерзлого грунта варьируют

от -0.67°C до -0.12°C (рис. 1). Верхняя часть толщи мерзлых грунтов в интервале от 3.0 м до 7.8 м представлена суглинками, ниже, в интервале 7.8 – 16.0 м залегают пески.

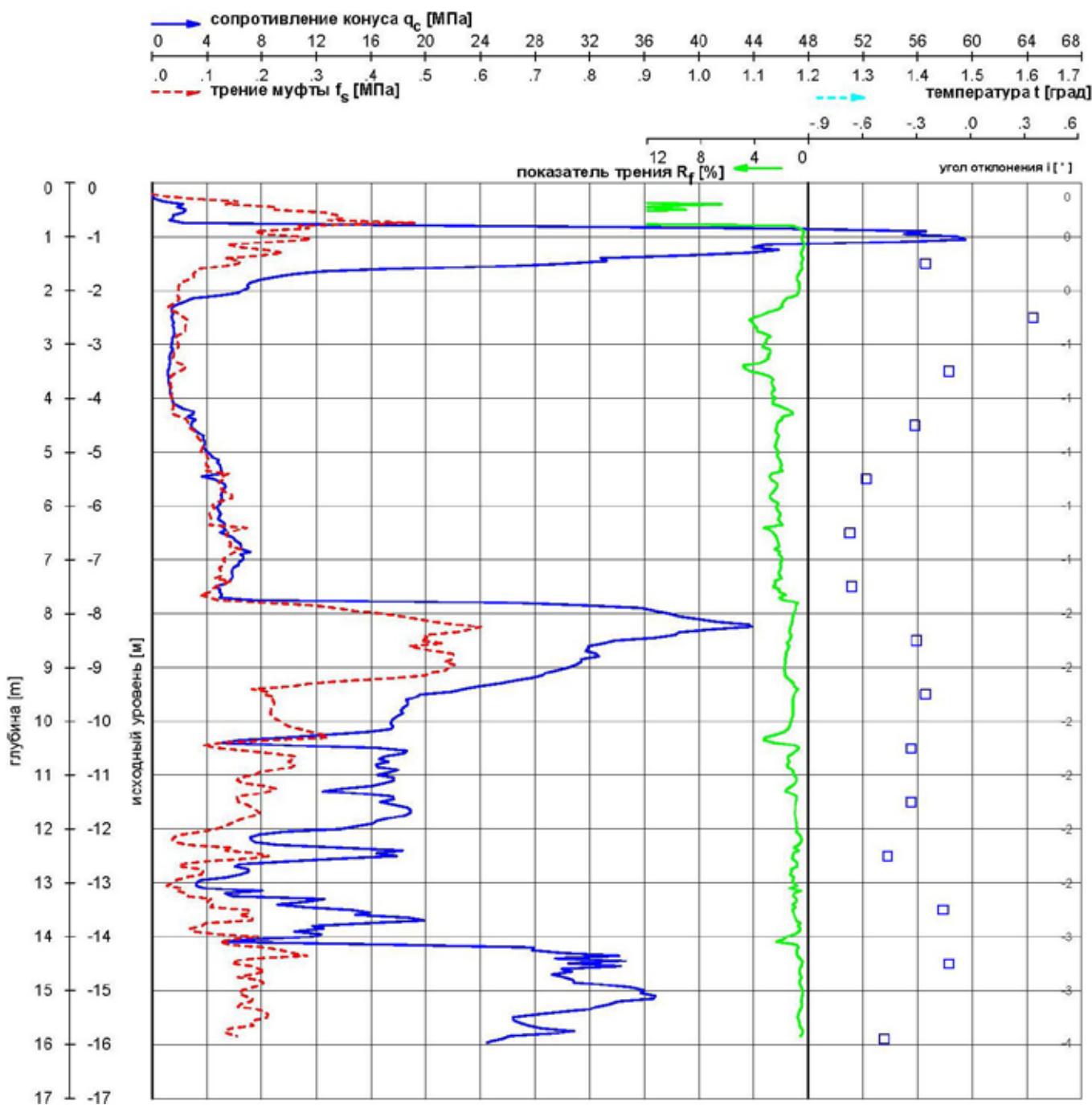


Рис. 1. График статического зондирования мерзлого грунта

Пример обработки логарифмическим уравнением длительной прочности.

Уравнение (1) преобразовывается в виде линейной функции $y = kx + b$:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\beta} \cdot \ln(t_p + 1) - \frac{1}{\beta} \cdot \ln T \quad (2)$$

где $- y = 1/\tau$, $x = \ln(tp+1)$, $k = 1/\beta$, $b = -1/\beta \cdot \ln T$.

На рис. 2 представлен пример обработки линеаризованных данных по лобовому сопротивлению и боковому трению зонда в процессе испытания со стабилизацией.

Величина достоверности линейной аппроксимации данных в случае лобового сопротивления составляет 0,997, а бокового трения – 0,989. На основе полученных коэффициентов выводится два

уравнения длительной прочности на сжатие $\sigma_c(t)$ при $k=0.0125$ и $b=0.0247$ (3) и длительной прочности на сдвиг $\sigma_s(t)$ при $k=2.0883$ и $b=6.6427$ (4):

$$\sigma_c(t) = \frac{80}{\ln \frac{t_p + 1}{0,139}} \quad \sigma_s(t) = \frac{0,479}{\ln \frac{t_p + 1}{24,069}} \quad (3,4)$$

где $\sigma_c(t)$ и $\sigma_s(t)$ – длительная прочность грунта на сжатие и сдвиг, соответственно.

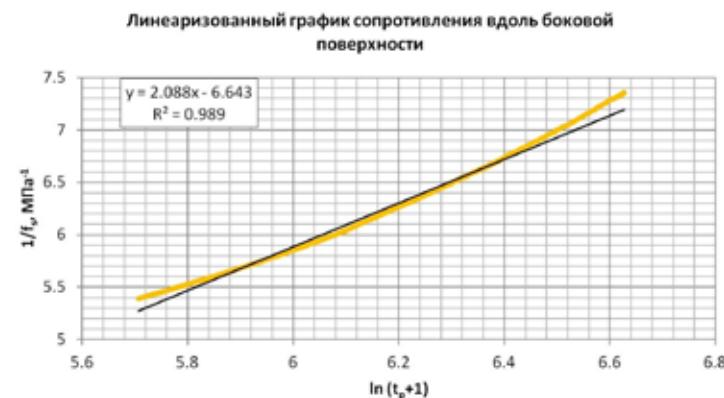
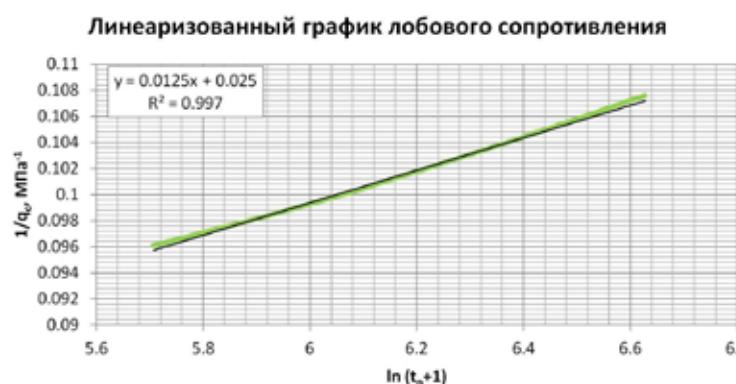


Рис. 2. Пример обработки логарифмической функцией данных лобового сопротивления и бокового трения

Ниже приводится таблица значений коэффициентов k и b , также значения критерия достоверности линейной аппроксимации R^2 .

Таблица 1 Коэффициенты линейных уравнений длительной прочности и величина достоверности линейной аппроксимации логарифмической функции для $\sigma_c(t)$ и $\sigma_s(t)$

Глубина замера, м	Лобовое сопротивление для $\sigma_c(t)$			Боковое трение для $\sigma_s(t)$		
	k	b	R^2	k	b	R^2
3.5	0.1172	1.3224	0.9930	25.5760	-91.1140	0.9410
4.5	0.1833	0.2110	0.9940	38.2090	-118.4600	0.9790
5.5	0.0782	0.2941	0.9980	4.6117	-4.3246	0.9900
6.5	0.0700	0.2084	0.9998	55.5740	-265.1300	0.9580
7.5	0.0402	0.2735	0.9997	1.2660	5.3607	0.9892
8.5	0.0150	-0.0433	0.9920	3.2256	-16.3550	0.9528
9.5	0.0212	-0.0489	0.9937	4.0813	-18.2870	0.9830
10.5	0.0140	0.0235	0.9971	7.2682	-31.9030	0.9743
11.5	0.0125	0.0247	0.9974	2.0883	-6.6427	0.9885

Рассмотренные выше уравнения длительной прочности хорошо описывают процесс релаксации напряжения в мерзлом грунте, что иллюстрируют значения критерия достоверности линейной аппроксимации, которые показаны в таблице 1. Также можно проследить, что по характеру релак-

сации напряжения можно судить о степени проявления реологических свойств, которые в свою очередь зависят от льдистости и типа грунта. Так для суглинка характерен более плавный характер релаксации напряжений, в песках же релаксация происходит стремительнее.

Расчет несущей способности свай и сравнение результатов с натурным испытанием свай статической нагрузкой.

Далее авторами проводился расчет несущей способности свай на основе результатов, обработанных описанными уравнениями длительной прочности для интервалов времени 10 дней и 100 лет. Методика расчета включает в себя последовательное суммирование значений лобового сопротивления и бокового трения *без использования поправочных или иных эмпирических коэффициентов*.

Расчет производился по формуле (5):

$$F_{ui}(t) = R_c(t) \cdot A + \sum R_{afc,i}(t) \cdot A_{afc,i} \quad (5)$$

где $R_c(t) = \sigma_c(t)$ – среднее значение прочности грунта на сжатие, полученное путем осреднения значений на один диаметр выше и четыре диаметра ниже наконечника зонда; A – площадь поперечного сечения сваи; $R_{afc,i}(t) = \sigma_s(t)$ – прочность грунта на сдвиг; $A_{afc,i}$ – площадь поверхности среза i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, м².

Методика такого расчета сходна с общепринятой методикой, однако в ней отсутствуют поправочные и эмпирические коэффициенты. Основой расчета служат полученные значения длительной прочности мерзлого грунта с помощью статического зондирования. Значения берутся напрямую и суммируются. Расчет производился для вычисленных значений σ_c и σ_s каждого замера релаксации напряжения для интервала времени 10 дней и 100 лет. Так рассчитанная несущая способность забивной сваи 300x300 мм, длиной 10,6 м в мерзлом грунте для интервала времени 10 дней составила 64,4 тс, а для интервала времени 100 лет – 39,8 тс.

Натурное испытание железобетонной сваи квадратного сечения 300x300 мм статической вдавливающей нагрузкой проводились на расстоянии 2 метров от точки испытания статического зондирования. Способ погружения буровзабивной, диаметр лидерной скважины составил 290 мм. Глубина погружения сваи составила 10,6 м. Натурное испытание сваи статической вдавливающей нагрузкой проводилось в соответствии с ГОСТ 5686-2012 «Методы полевых испытаний

сваями» с применением 10 ступеней нагружения, начиная с 10 тс с выдерживанием каждой ступени не менее 1 суток. По данным полевых испытаний предельная нагрузка на сваю, при которой сохраняется затухающий характер осадки составила $F_h = 55$ тс, нагрузка при которой начала развиваться осадка с увеличивающейся скоростью составила $F_h = 60$ тс.

Далее по методике ГОСТ 20522-2012 рассчитывалось значения предельно-длительной несущей способности по формуле (6):

$$F_h^H = K_t \cdot F_h \quad (6)$$

где $K_t = 0,65$ и частное значение предельно-длительного сопротивления сваи составило $F_h^H = 35,8$ тс.

Как видно, полученные результаты оказались очень близки друг к другу. Авторы намеренно не включали в расчет никакие поправочные и/или эмпирические коэффициенты, для того чтобы подчеркнуть объективность разработанной методики. Незначительное различие полученных результатов может быть объяснено неоднородностью грунтового массива.

Важно отметить, что данная методика обработки данных отличается от методики, предложенной Исаевым О.Н. В работе Исаева О.Н. [4] предлагается вести расчет на основе эмпирических коэффициентов. Так для расчета составляющей под нижним концом сваи предлагается воспользоваться коэффициентом релаксации K_r равным 0,42, полученным для суглинков. K_r равен отношению $q_s(50 \text{ лет}) / q_s(5 \text{ мин})$. Рассчитанные по этой формуле значения K_r для рассматриваемых испытаний оказались достаточно близки к данным Исаева О.Н., но только для суглинков, где K_r изменялся от 0,31 до 0,52 при среднем значении 0,42. Однако для песков K_r изменялся от 0,37 до 0,11 при среднем значении 0,27. В свою очередь, сравнить выведенные Исаевым О.Н. эмпирические коэффициенты для бокового трения не представилось возможным, поскольку в работе [4] указано, что «... вопрос определения предельного сопротивления мерзлого грунта вдоль боковой поверхности сваи с использованием статического зондирования является весьма сложным и до настоящего времени изучен недостаточно».

Этот вывод был сделан 30 лет назад. За последние десятилетия оборудование для статического зондирования шагнуло далеко вперед, а точность измерений возросла на порядки. Это объясняет открывшиеся возможности для определения предельного сопротивления мерзлого грунта вдоль

боковой поверхности сваи с использованием статического зондирования. Таким образом, впервые удалось решить проблему прямого расчета несущей способности сваи на основе результатов испытаний с помощью статического зондирования. ■

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» (ГК Фугро)

Москва

+7 (495) 637-00-12

ngv@fugro.ru, ssi@fugro.ru

www.fugro.ru

Литература:

1. Вялов С.С. *Реологические основы механики грунтов.* – Москва: Изд-во Высшая школа, 1978. – 447 с.
2. ГОСТ 19912-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием»
3. ГОСТ Р 22476-1-2017 «Статическое и пьезостатическое зондирование электрическим зондом»
4. Исаев О.Н., Волков Ф.Е., Минкин М.А. *Определение несущей способности свай в пластично-мерзлых грунтах статическим зондированием / Основания, фундаменты и механика грунтов.* 1987, №5, с.17-19.
5. Роман Л. Т. *Механика мерзлых грунтов.* – Москва: Москва, 2002. – 425 с.
6. Рыжков И. Б., Исаев О.Н. *Статическое зондирование грунтов / Москва: Изд-во АСВ, 2010. – 496 с.*
7. РСЧ-33-70 Инструкция по испытанию грунтов статическим зондированием. / Москва: Изд-во Госстроя СССР, 1970. – 30 с.
8. ASTM D 5778 «Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils»
9. ISO 22476-1:2012 «Geotechnical investigation and testing -- Field testing -- Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test»
10. Lunne T., Robertson P.K. and Powell J.J. *Cone penetration testing in geotechnical practice.* / London and New York: Изд-во Spon Press, 2004.
11. Volkov, N., Sokolov, I. & Jewell, R. *Investigation by Cone Penetration Tests of Piled Foundations in Frozen Soil Maintained by Thermosyphons.* // ISSN 2313-4410, ASRJETS, 2017, Volume 31, No 1, pp 40-58.
12. Volkov N., Sokolov I., Jewell R.. *Cone penetration testing of permafrost soils.* Proceedings 5th European Conference on Permafrost, France, Chamonix Mont Blanc, 2018, pp. 215-216.
13. Volkov N., Sokolov I., Jewell R.. *CPT Testing in Permafrost.* Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing. CPT'18, Netherlands, Delft, 2018, pp. 1258-1268.