

Материалы 5-ой конференции «День науки 2020»

Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Звенигородская биостанция МГУ имени М.В. Ломоносова

22-23 января 2020 г.



Москва

2020

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛОГО ГРУНТА  
СТАТИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ**

Соколов И.С.<sup>1</sup>, Лагоша Д.В.<sup>2</sup>, Волков Н.Г.<sup>1</sup>, Исаев В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ГЕОИНЖСЕВИС» (международнaя группа компаний Фугро), Москва,  
Россия; [ssi@fugro.ru](mailto:ssi@fugro.ru)

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия;  
[tpomed@rambler.ru](mailto:tpomed@rambler.ru)

В статье описаны результаты экспериментов по определению длительной прочности мерзлого грунта в массиве на сжатие и сдвиг по поверхности смерзания с помощью статического зондирования. Проведен анализ изменчивости величины длительной прочности в зависимости от дисперсности и льдистости грунтов. Также выполнено сравнение величины сдвига по поверхности смерзания со сталью с величиной значения срыва муфты зонда статического зондирования после смерзания с массивом грунта.

**LONGTERM STRENGTH MEASUREMENT OF FROZEN SOIL BY CONE PENETRATION  
TESTING**

Sokolov I.S.<sup>1</sup>, Lagosha D.V.<sup>2</sup>, Volkov N.G.<sup>1</sup>, Isaev V.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEOINGSERVICE LLP (Fugro Group), Moscow, Russia; [ssi@fugro.ru](mailto:ssi@fugro.ru), [ngv@fugro.ru](mailto:ngv@fugro.ru)

<sup>2</sup>Lomonosov MSU, Department of Geocryology, Moscow, Russia; [tpomed@rambler.ru](mailto:tpomed@rambler.ru)

The article provides the results on long-term compressive strength and shear strength measurements of frozen soil by cone penetration testing. The value range of long-term strength is analyzed in the view of particle size and ice content of the studied soils. Shear strength with steel is also compared with the value of clutch failure of the static probe after freezing with the ground mass.

### *Введение*

Промышленное и гражданское строительство в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов активно ведется на протяжении нескольких десятков лет. За это время собран множественный негативный опыт потери устойчивости сооружений в силу особенностей работы мерзлых грунтов в качестве оснований сооружений. В настоящее время наблюдается активизация темпов строительства на Севере, ведется обустройство и разработка новых нефтяных и газовых месторождений Ямала и Гыдана, развитие инфраструктуры северных городов, что требует привлечения новых и эффективных технологий строительства. Источником информации для таких технологий должны служить более точные и детальные методы инженерных изысканий. Механические свойства мерзлых грунтов существенно отличаются от талых в силу наличия в их составе льда. В первую очередь это отчетливое проявление реологии за короткий промежуток времени приложения нагрузки. Степень проявления реологических свойств зависит от физических характеристик мерзлого грунта (льдистости, влажности, криогенной текстуры). Реологические свойства грунтов проявляются в виде ползучести, релаксации и уменьшении прочности во времени при длительном действии нагрузок. В статье рассмотрен вопрос определения длительной прочности мерзлого грунта методом релаксации напряжения в массиве при статическом зондировании.

### *Методика проведения экспериментов*

Эксперименты выполнялись на промышленных площадках в городах Лабытнанги, Салехард, Новый Уренгой и п-ов Гыданский [19, 20] по методике прерывистого задавливания зонда в грунт [13, 18]. Зонд погружался в грунт с постоянной скоростью, однако на заранее заданной глубине выполнялись перерывы. В перерывах задавливания давление масла не сбрасывается для поддержания наконечника зонда строго на постоянной глубине. Каждый перерыв соответствует отдельному испытанию, при

котором производилась запись во времени таких данных, как лобовое сопротивление и боковое трение, а также других дополнительных датчиков зонда, измеряющих поровое давление и температуру.

Процесс релаксации напряжений приводит к нарастанию пластической деформации за счет уменьшения доли упругой при неизменной величине общей суммарной деформации, что и ведет к медленному уменьшению напряжения в силовых датчиках зонда.

Замер продолжался до момента пока показания силовых датчиков оставались неизменными в течение некоторого промежутка времени или постепенно уменьшались на некоторую малую величину (II участок кривой релаксации) [13]. Также при проведении замеров производилась запись температуры с помощью зонда. Фиксация стабильной отрицательной температуры датчика свидетельствует о вмерзании зонда в грунт и производилось измерение величины сдвига по поверхности смерзания муфты зонда с грунтом.

Полученные данные обрабатывались раздельно по датчикам лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности с применением логарифмического уравнения длительной прочности.

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

Таким образом, были получены значения длительной прочности грунта. Данные от датчика лобового сопротивления – это длительная прочность грунта на сжатие  $\sigma_c$ , а для данных от датчика трения грунта по боковой поверхности – это величина длительной прочности на сдвиг  $\sigma_s$ .

### *Результаты определения длительной прочности мерзлых грунтов*

Грунты площадок были исследованы на глубину до 50,5 м и представлены песками слабольдистыми различной крупности, супесями нельдистыми и слабольдистыми, а также суглинками с различной степенью льдистости. Для грунтов, охарактеризованных на всех площадках исследований, оценивались средние значения  $\sigma_c$ , и  $\sigma_s$  длительной прочности (Таблица 1). Выполнено сравнение полученных данных с рекомендуемыми значениями

## МАТЕРИАЛЫ 5-ОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДЕНЬ НАУКИ 2020»

давления под нижним концом свай ( $R$ ) и сопротивлением грунта по поверхности смерзания ( $R_{af}$ ), приведенными в табл. В.1 и В.3 СП 25.13330.2012 [17].

Таблица 1. Сравнение значений длительной прочности глинистых в песчаных грунтов на сжатие и сдвиг с рекомендованными значениями  $R$  и  $R_{af}$  в СП 25.13330.2012

| Грунт    |                                 | КОЛ-ВО замеров | Температура грунта, °C |       | Глубина замера, м |      | $\sigma_c$ , МПа | $R$ , МПа | $\sigma_s$ , кПа | $R_{af}$ , кПа |
|----------|---------------------------------|----------------|------------------------|-------|-------------------|------|------------------|-----------|------------------|----------------|
| Тип      | Описание                        |                | от                     | до    | от                | до   |                  |           |                  |                |
| 1        | 2                               | 3              | 4                      | 5     | 6                 | 7    | 8                | 9         | 10               | 11             |
| Суглинок | нельдистый                      | 21             | -0,66                  | -0,33 | 19,5              | 50,5 | 2,43             | 0,90-1,10 | 69               | 40-100         |
|          | слабольдистый                   | 34             | -0,70                  | -0,18 | 9,5               | 25,5 | 1,34             | 0,80-0,95 | 35               | 40-100         |
|          | льдистый                        | 17             | -0,36                  | -0,20 | 5,4               | 7,5  | 0,71             | 0,40-0,55 | 19               | 40-60          |
| Суслесь  | нельдистая                      | 5              | -0,41                  | -0,15 | 8,0               | 19,4 | 2,23             | 0,75-1,05 | 114              | 40-60          |
|          | слабольдистая                   | 19             | -0,50                  | -0,12 | 9,5               | 32,0 | 2,18             | 0,85-1,05 | 53               | 40-60          |
| Песок    | слабольдистый пылеватый         | 14             | -0,60                  | -0,25 | 10,0              | 21,5 | 1,96             | 1,00-1,80 | 23               | 50-130         |
|          | слабольдистый мелкий            | 32             | -0,45                  | -0,12 | 9,5               | 25,4 | 4,58             | 1,00-1,70 | 63               | 50-80          |
|          | слабольдистый средней крупности | 24             | -0,16                  | -0,12 | 15,4              | 25,6 | 6,98             | 1,50      | 171              | 50             |

Также оценивалась величина касательного напряжения (прочность смерзания муфты трения) зонда после смерзания с массивом грунта в процессе замера релаксации напряжения и температуры (Таблица 2). Для проверки полученных значений были выполнены сравнительные испытания грунтов методом среза по поверхности смерзания со сталью в соответствии с ГОСТ 12248–2012 [15]. Физические характеристики грунтов определялись в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [14].

Таблица 2. Сравнение значений срыва муфты зонда после смерзания с массивом грунта со значениями среза по поверхности смерзания со сталью  $R_{af}$  по лабораторным данным.

| Наименование грунта | Лаборатория | Статическое |
|---------------------|-------------|-------------|
|---------------------|-------------|-------------|

|   |                      |                      |                       | зондирование           |                       |
|---|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
|   | W <sub>tot</sub> , % | ρ, г/см <sup>3</sup> | R <sub>af</sub> , МПа | Количество определений | R <sub>af</sub> , МПа |
| Суглинок слабольдистый                    | 30,7                 | 1,81                 | 0,127                 | 15                     | 0,124                 |
| Суглинок льдистый                         | 42,7                 | 1,69                 | 0,078                 | 7                      | 0,093                 |
| Супесь нельдистая                         | 19,0                 | 1,97                 | 0,103                 | 2                      | 0,102                 |
| Супесь слабольдистая                      | 25,0                 | 1,88                 | 0,073                 | 6                      | 0,089                 |
| Песок пылеватый<br>слабольдистый,         | 20,2                 | 1,92                 | 0,093                 | 4                      | 0,100                 |
| Песок мелкий<br>слабольдистый,            | 21,5                 | 1,86                 | 0,140                 | 9                      | 0,138                 |
| Песок средней крупности<br>слабольдистый, | 22,0                 | 1,85                 | 0,189                 | 7                      | 0,197                 |

*Анализ полученных результатов выявил следующие закономерности:*

1. В суглинках и супесях с увеличением льдистости значения  $\sigma_c$ , и  $\sigma_s$ , как и рекомендованные R и R<sub>af</sub>, снижаются. Это подтверждается теоретическими основами механики мерзлых грунтов, из которых следует, что при увеличении степени льдистости грунта показатели его прочностных свойств уменьшаются при прочих равных условиях.

2. Увеличение дисперсности грунта ведет к уменьшению значений длительной прочности  $\sigma_c$ , и  $\sigma_s$ , равно как и рекомендованных R и R<sub>af</sub>. Это подтверждается тем, что при увеличении размеров частиц грунта, показатели его прочностных свойств повышаются, при прочих равных условиях.

3. Значения  $\sigma_c$  получились несколько выше рекомендованных значений R в частности: от достаточно близких результатов у песка пылеватого (1,96 и 1,0–1,8 МПа) до расхождения в несколько раз – у песка средней крупности (6,98 и 1,5 МПа). Такая разница в значениях может быть объяснена заниженными рекомендуемыми значениями в [17]. Это косвенно подтверждается рекомендованными значения R для немерзлого песка средней крупности, приведенные в [16], которые варьируют в диапазоне 4,0–5,2 МПа для рассматриваемых глубин погружения нижнего конца сваи. Данные рекомендованные значения для немерзлых песков (4,0–5,2 МПа) значительно превышают рекомендуемые значения для мерзлых песков (1,0–1,8 МПа).

4. Значения  $\sigma_s$  полученные по методике [13], (23–171 кПа) и рекомендованные  $R_{af}$  (40–130 кПа), оказались достаточно близкими. Среднее значение длительной прочности  $\sigma_s$  песка мелкого укладывается в диапазон значений  $R_{af}$  (63 и 50–80 кПа). Значения длительной прочности  $\sigma_s$  для песка пылеватого слабольдистого (23 кПа) и суглинка льдистого (19 кПа) оказались меньше рекомендованных значений  $R_{af}$  (50–130 и 40–60 кПа, соответственно). Для супеси нельдистой и песка средней крупности слабольдистого значения  $\sigma_s$  оказались немногим выше рекомендованных значений  $R_{af}$  (40–60 и 50 кПа, соответственно).

5. Значения касательного напряжения при вдавливании зонда после смерзания с массивом грунта показали хорошее совпадение со значениями среза по поверхности смерзания со сталью  $R_{af}$ , для охарактеризованных типов грунтов. Однако значения смерзания оказались несколько выше значений длительной прочности на сдвиг  $\sigma_s$ .

### *Заключение*

На основе разработанной методики определения длительной прочности мерзлого грунта статическим зондированием были выполнены испытания на промышленных площадках с различными типами мерзлых грунтов. Полученные результаты определения величины длительной прочности не противоречат теоретическим основам механики мерзлых грунтов и накопленному опыту полевых испытаний несущей способности свай в мерзлых грунтах, обобщенному в СП 25.13330.2012. Проведены лабораторные исследования физико-механических характеристик грунтов, охарактеризованных на площадках исследования, и выявлено хорошее совпадение результатов среза по поверхности смерзания со сталью в лабораторных условиях с величиной касательного напряжения при вдавливании зонда после смерзания с массивом мерзлого грунта. Показана возможность установления прочностных характеристик массива мерзлых грунтов статическим зондированием на глубину до 50 м.

### *Литература*

13. Волков, Н.Г., Соколов, И.С. Расчет несущей способности свай на основе определения длительной прочности в массиве мерзлых грунтов методом статического зондирования / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Геотехника. – 2019. – № 1. – С. 68–78.
14. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введен 2016-04-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.

## **МАТЕРИАЛЫ 5-ОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДЕНЬ НАУКИ 2020»**

15. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Введен 2012-01-01 – М.: Стандартинформ, 2011. – 78 с.
16. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 – М.: Госстрой, 2011 – 116 с.
17. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 – М.: Госстрой, 2012 – 123 с.
18. СТО 36554501–049–2016 Применение статического зондирования для контроля оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. – М.: ОАО «НИЦ «Строительство», 2016. – 58 с.
19. Volkov, N., Sokolov, I., Jewell, R. Cone penetration testing of permafrost soils / N. Volkov [and etc.] // Proceedings 5th European Conference on Permafrost. – 2018. – pp. 215–216.
20. Volkov, N., Sokolov, I., Jewell, R. CPT Testing in Permafrost. Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing / N. Volkov [and etc.] // – CPT'18. – Netherlands, Delft – 2018. – pp. 1258–1268.