

Блажко А.В., Волков Н.Г.

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», г. Москва, bav@fugro.ru, ngv@fugro.ru

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ГРУНТАХ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Аннотация. Определение фазового состояния грунтов в массиве особенно в зоне распространения прерывистой и высокотемпературной мерзлоты является актуальной проблемой, которая на практике очень часто остается нерешенной. Статическое зондирование мерзлых толщ позволяет с высокой точностью провести измерение температуры грунта. Однако этого недостаточно, чтобы установить мерзлый грунт или нет. Накопление авторами опыта и материалов, связанных с зондированием мерзлых грунтов, позволило подтвердить открытые ранее тепловые эффекты и дать количественное описание тепловому эффекту «охлаждения зонда». Это позволит эффективно и достоверно определять фазовое состояние грунтов массива и, как следствие, выделять границы залегания многолетнемерзлых грунтов.

Ключевые слова: статическое зондирование; тепловые эффекты; мерзлые грунты; криолитозона; льдистые грунты; температура мерзлых грунтов.

При выполнении статического зондирования зонд внедряется в грунтовый массив со скоростью 2 см/с и параллельно записывает показания различных датчиков:

- лобовое сопротивление q_c , МПа;
- боковое трение f_s , МПа;
- поровое давление u_2 , МПа;
- температура T , °С и другие параметры.

В талых грунтах в процессе задавливания зонд разогревается. Обычно величина разогрева варьирует от малых величин (илы, текучие глины) до десятков градусов (плотные пески) (рис. 1). Из практики авторов, разогрев может достигать до 1°C на 1 МПа лобового сопротивления (q_c) в талых песчаных грунтах. Данная проблема известна среди специалистов в инженерной среде, использующих статическое зондирование. А в ISO 22476-1:2012 «Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test» [3, 7] и ГОСТ 19912-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием» [2] есть указание на термокомпенсацию датчиков силы в зондах и приведена причина, по которой происходит разогрев зондов.

Разогрев зонда в талых грунтах, несмотря на то что является проблемой для корректного считывания датчиков силы, может быть также и источником ценных данных – использоваться для оценки теплофизических свойств грунтов. P.J. Vardon et al. в своей работе [8] приводят методику оценки теплопроводности и теплоемкости талых грунтов на основе температурных диссипационных испытаний, а именно, по кривым диссипации температуры зонда (изменению температуры зонда во времени).

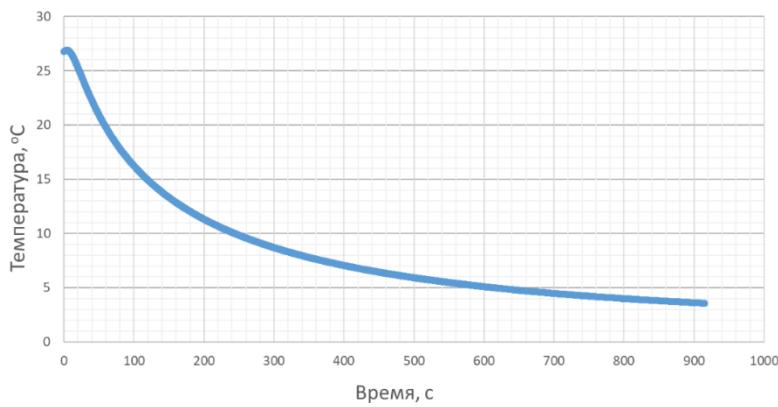


Рис. 1. Термограмма диссипационного испытания после теплового эффекта «нагрева зонда» в талом песке

В мерзлых грунтах зонд разогревается существенно меньше, чем в талых. Достаточно редко, по опыту авторов, разогрев зонда превосходил несколько градусов по шкале Цельсия (рис. 2). В мерзлых грунтах достаточно часто встречается охлаждение зонда (рис. 3). Этот эффект известен и опубликован в работе [4].

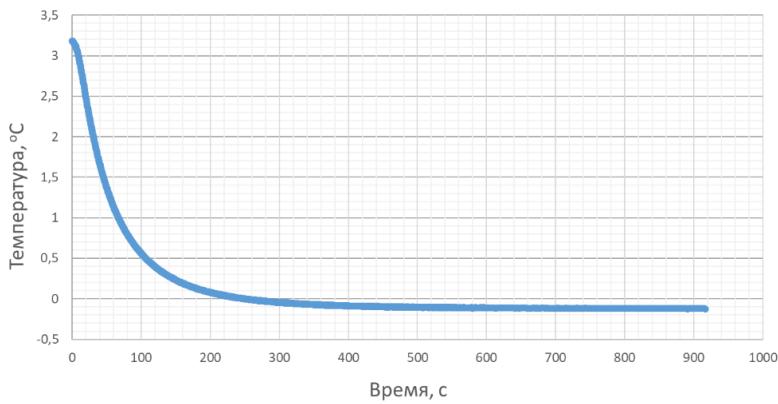


Рис. 2. Термограмма диссипационного испытания после теплового эффекта «нагрева зонда» в мерзлом песке

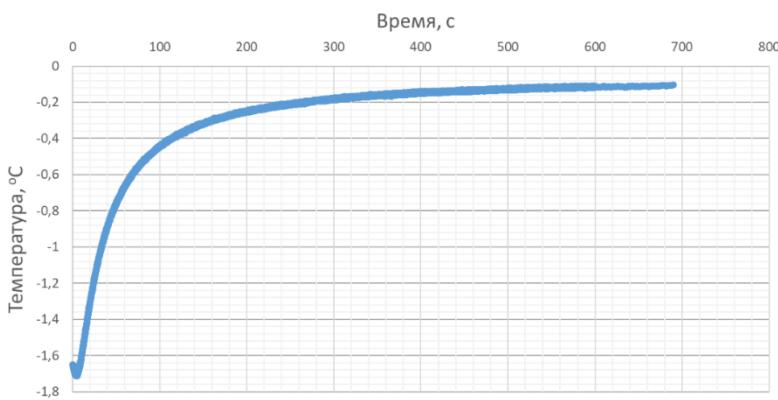


Рис. 3. Термограмма диссипационного испытания после теплового эффекта «охлаждения зонда» в мерзлой, сильнольдистой глине

Объяснение этого эффекта приводится достаточно кратко: «*В результате теоретических исследований была разработана модель теплофизического взаимодействия системы «зонд–мерзлый грунт», объясняющая выявленный эффект «псевдоаномального охлаждения зонда». В основу модели легло положение о наличии двух взаимно противоположных тепловых процессов, происходящих на границе системы «движущийся зонд–мерзлый грунт». Первый обусловлен потоком поглощаемого зондом тепла, образующегося в результате трения; второй – потоком отдаваемого зондом тепла, образующегося в результате понижения температуры плавления льда при высоких давлениях. В зависимости от соотношения этих потоков температура зонда может повышаться или понижаться*». Этот эффект также был зафиксирован и подтвержден авторами в процессе выполнения температурных измерений с помощью статического зондирования на различных площадках [1, 5].

Разогрев зонда в мерзлых грунтах также может сопровождаться переходом через температуру начала замерзания грунта в процессе испытания температурной диссипации (рис. 4). В этом случае наблюдается характерная полка, схожая с «полкой» на термограмме замерзания (или оттаивания), получаемая при испытаниях криоскопическим методом. Возможно, стоит рассмотреть такие кривые диссипации температуры на предмет определения температуры начала замерзания. Однако, данная тема не рассматривается в публикации и является предметом отдельного исследования.

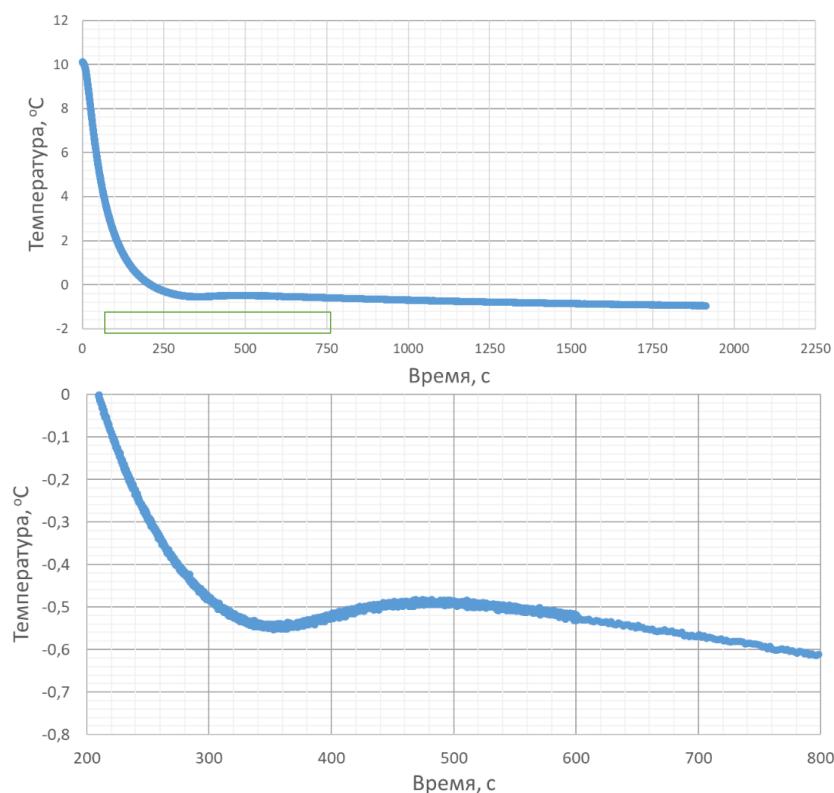


Рис. 4. Термограмма диссипационного испытания с переходом через температуру начала замерзания в мерзлом песке

Подробнее рассмотрены процессы, возникающие при внедрении зонда в мерзлый грунт, и тепловые эффекты, связанные с ними.

1) Трение зонда о грунт. Трение – это процесс механического взаимодействия соприкасающихся тел при их относительном смещении в плоскости касания (внешнее трение). В случае зонда трение проходит по плоскости «зонд–грунт». Зонд погружается в грунт со скоростью 2 см/с, трение вызывает их разогрев. Энергия разогрева аккумулируется в зонде, что выражается в повышении его температуры. В случае остановки зонда его накопленная тепловая энергия будет рассеиваться в окружающий грунт. Если температура зонда будет выше температуры начала замерзания грунта, то последний будет оттаивать недолго, а потом замерзать обратно, как только накопленная в зонде тепловая энергия покинет его, а температура опустится ниже температуры начала замерзания окружающего грунта. Важно отметить, что в данном процессе источником тепла является зонд. Тепловой эффект – это нагревание зонда в процессе пенетрации и охлаждение в процессе диссипационного испытания. Для краткости этот тепловой эффект называют «нагревом зонда», поскольку внимание сосредоточено на процессе пенетрации (задавливания зонда), а не диссипации (стабилизации зонда).

2) Понижение температуры фазового перехода «вода–лед» при высоких давлениях. Известно, что с повышением давления (по отношению к атмосферному) температура замерзания воды снижается [6]. Формула, описывающая данную закономерность, приведена ниже:

$$\frac{P}{P_0} = 1 + \sum_{i=1}^3 a_i \left[1 - \left(\frac{T}{T_0} \right) b_i \right] ,$$

где P – давление, Па; T – температура, К.

$P_0 = 611,657$ Па	$T_0 = 273,16$ К
$a_1 = 1\ 195\ 393,37$	$b_1 = 3,00$
$a_2 = 80\ 818,3159$	$b_2 = 25,75$
$a_3 = 3\ 338,2686$	$b_3 = 103,75$

В диапазоне температуры от 0 до -4°C данная формула дает результат примерно в 13 МПа на 1°C . Другими словами, при увеличении давления на 13 МПа температура начала замерзания воды снизится на 1°C .

При задавливании зонда в мерзлый грунт лобовое сопротивление может достигать величин от 6–8 до 50–60 МПа, что потенциально может снизить температуру фазового перехода льда в мерзлых грунтах на несколько градусов. Как только температура фазового перехода окажется ниже естественной температуры грунта, лед в мерзлом грунте начнет таять. Этот процесс энергозатратен и будет происходить до тех пор, пока температура грунта не снизится до температуры фазового перехода грунта при P – T условиях, локально

и временно созданных в мерзлом грунте под конусом наконечника зонда. Данний тепловой эффект называют «охлаждением зонда».

Представленные выше тепловые эффекты проиллюстрированы на рис. 1, 2 и 3. Эффект «нагрева зонда» встречается как в глинистых, так и в песчаных мерзлых грунтах. В последних он выражен наиболее сильно. Тепловые эффекты могут проявляться одновременно, что выражается в более сложной термограмме испытания (рис. 5).

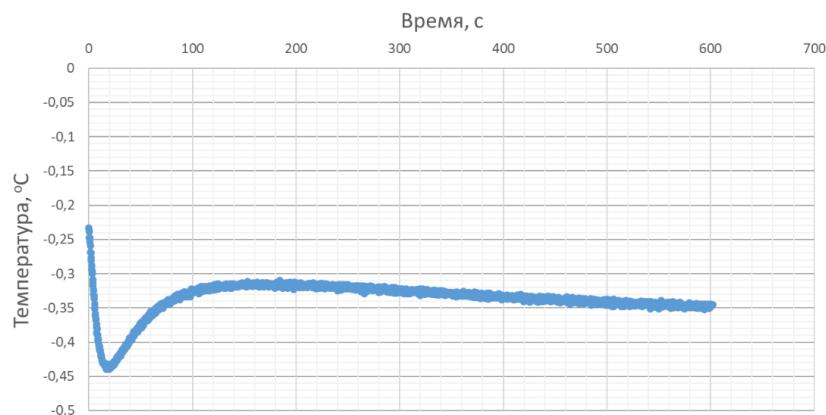


Рис. 5. Термограмма диссипационного испытания с тепловыми эффектами нагрева и охлаждения

Эффект «охлаждения зонда», по опыту авторов, приурочен ко льдистым и сильнольдистым глинистым мерзлым грунтам. В слабольдистых и нельдистых мерзлых грунтах данный эффект не наблюдался, как в песчаных, так и в глинистых разностях. Этот вывод был сделан на основе анализа нескольких сотен измерений температуры в грунтах разного состава и генезиса на различных площадках инженерно-геологических изысканий.

На площадке близ г. Норильска был исследован грунт – глина слоистой криогенной текстуры, льдистая ($0,20 < i_l \leq 0,40$) или сильнольдистая ($0,40 < i_l \leq 0,80$), текучая при оттаивании – и выполнено 22 измерения температуры. В данных испытаниях наблюдался эффект охлаждения зонда. На рис. 6 приведена зависимость степени изменения температуры зонда (ΔT) от лобового сопротивления (q_c) (синяя линия). Цель этой диаграммы – показать взаимосвязь снижения температуры зонда в процессе его задавливания от величины лобового сопротивления. Видно, что представленные данные хорошо описываются линейным уравнением. Если исходить из предположения, что понижение температуры зонда обусловлено плавлением льда при высоких давлениях под конусом наконечника, то приведенная зависимость степени изменения температуры зонда (ΔT) от лобового сопротивления (q_c) должна иметь схожий характер с уравнением. На рис 6 приведен график (оранжевый), построенный по уравнению для исследуемого $P-T$ диапазона, где давление соответствует лобовому сопротивлению (q_c), а температура, скорректированная на 273,15 К, – температурному отклонению зонда (ΔT) от естественной

температуры грунта. Графики имеют схожий наклон, что интерпретируется следующим образом: при увеличении лобового сопротивления на величину порядка 13 МПа температура фазового перехода влаги в исследуемом грунте снизится на 1°C.

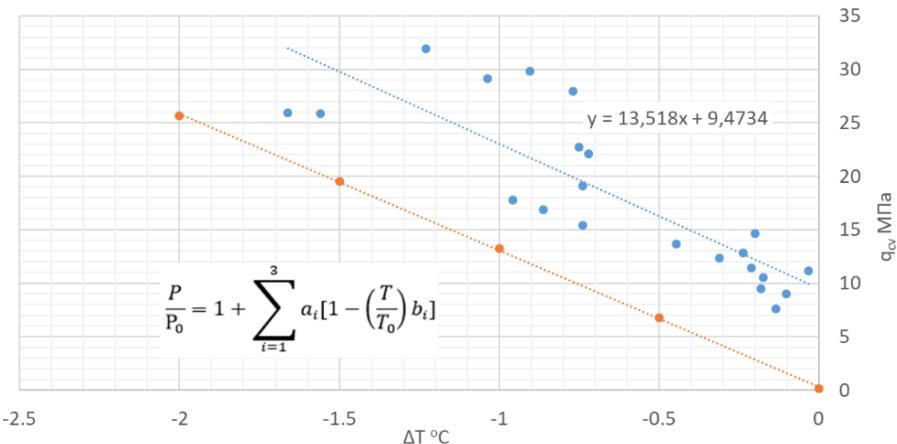


Рис. 6. Зависимость степени изменения температуры зонда (ΔT) от лобового сопротивления (q_c)

В работе [4], на с. 363, приводится график зависимости степени изменения температуры термометрического зонда от температуры мерзлого грунта. В целях сравнения полученных результатов аналогичный график построен на основе авторских измерений температуры (рис. 7). В результате анализа выявлено, что охлаждение зонда может достигать значительно больших, чем опубликовано ранее, величин [4]. На рис. 7 показано, что охлаждение зонда при его внедрении в сильнольдистый грунт достигало $-1,66^{\circ}\text{C}$ при естественной температуре грунта $T_n = -0,05^{\circ}\text{C}$.

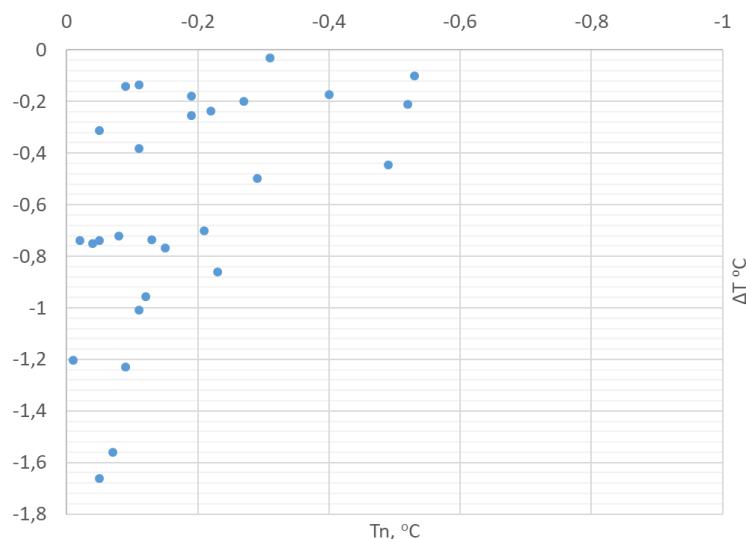


Рис. 7. Зависимость степени изменения температуры зонда (ΔT) от температуры мерзлого грунта (T_n)

Список литературы

1. Волков Н.Г., Соколов И.С. Сравнение температурных замеров грунтов с помощью статического зондирования и скважинной термометрии // Инженерные изыскания. 2018. № 7–8. С. 16–24. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-16-24>.
2. ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
3. ГОСТ Р ИСО 22476-1-2017 Испытания полевые. Часть 1. Статическое и пьезостатическое зондирование электрическим зондом.
4. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. М.: АСВ, 2010. 496 с.
5. Соколов И.С. Методика определения прочностных свойств мерзлых грунтов статическим зондированием: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020. 149 с.
6. IAPWS R14-08(2011). Revised release on the pressure along the melting and sublimation curves of ordinary water substance.
7. ISO 22476-1:2012 Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: electrical cone and piezocone penetration test, IDT.
8. Vardon P.J., Peuchen J. CPT correlations for thermal properties of soils // Acta Geotechnica. 2021. Vol. 16. P. 635–646. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01027-2>.

A.V. Blazhko, N.G. Volkov

GEOINGSERVICE LLC, Moscow, bav@fugro.ru, ngv@fugro.ru

THERMAL EFFECTS IN SOILS CAUSED BY CONE PENETRATION TESTING

Abstract. In-situ determination of phase condition in frozen soils especially in warm and discontinuous permafrost is a challenging issue, which often remains unsolved and ignored in practice. Cone penetration testing of frozen soils allow to measure soil temperature with high accuracy. However, knowing soil temperature is not enough to determine whether it is frozen or not. Experience gained by the authors, including new materials devoted to cone penetration testing of frozen soils, allows to confirm the thermal effects which were discovered earlier and provide quantitative estimate of the thermal effect called “cone cooling”. This will make it possible to effectively and reliably determine the phase state of the soils of the massif and, as a result, to identify the boundaries of the occurrence of permafrost.

Key words: cone penetration testing; thermal effects; frozen soils; permafrost; ice-rich permafrost; frozen soil temperature.