

УДК 624.131

DOI: [10.37153/2618-9283-2026-1-163-179](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2026-1-163-179)

Основы статического зондирования, подземные сооружения

Температурно-статическое зондирование: анализ теплофизического взаимодействия зонда с грунтом

Исаев Олег Николаевич¹

¹АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Исследование метода испытания грунтов в криолитозоне температурно-статическим зондированием (Т-СТ) и также интерпретация получаемых данных с целью определения геотехнических характеристик грунтов, используемых при расчете оснований и фундаментов, связано с решением ряда научно-технических задач.

Цель. Разработка модели и анализ теплофизического взаимодействия системы «Т-СТ зонд – грунт» с учетом влияния различных факторов (вида, состояния и температуры грунта; скорости зондирования и др.).

Материалы и методы. Полное исследование этих факторов сытным путем является весьма сложной задачей. В этих условиях особую актуальность приобретает разработка адекватных моделей такого взаимодействия. В работе представлена разработка модели теплофизического взаимодействия зонда с талым и мерзлым грунтом в процессе его задавливания. Для мерзлых грунтов рассмотрены различные варианты соотношения тепловых потоков твердой и фазовых переходов, а также его влияния на изменение температуры зонда.

Результаты. Предложена модель, позволяющая объяснить и прогнозировать характер изменения температуры зонда в процессе испытания талых и мерзлых грунтов с учетом характеристик зонда и грунта, скорости зондирования. Модель дает возможность объяснить физику и условия возникновения «эффекта псевдоаномального охлаждения зонда» при испытании пластично-мерзлых грунтов.

Выводы. Теплофизическое взаимодействие зонда с мерзлым грунтом носит более сложный характер, чем с талым – при зондировании пластично-мерзлых грунтов температура зонда может не только повышаться, но и понижаться. Механическое взаимодействие зонда с мерзлым грунтом следует рассматривать с учетом их теплофизического взаимодействия.

Ключевые слова: температурно-статическое зондирование, теплофизическая модель, тепловые потоки, температура зонда, эффект псевдоаномального охлаждения зонда

Для цитирования: Исаев О.Н. Температурно-статическое зондирование: анализ теплофизического взаимодействия зонда с грунтом // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2026. № 1. С. 163–179. DOI: [10.37153/2618-9283-2026-1-163-179](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2026-1-163-179)

Вклад автор

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

@Isaev O.N., 2026

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Bases and foundations, underground structures

Cone penetration test with temperature measurement (T-CPT): analysis of the thermophysical interaction of the cone penetrometer with the soil

Oleg N. Isaev¹

JSC «Research Center «Construction». Moscow, Russian Federation

Abstract

Introduction. The study of the Cone Penetration Test with Temperature Measurement (T-CPT) in the permafrost zone, as well as the interpretation of the obtained data for the purpose of determining the geotechnical characteristics of soils used in the calculation of bases and foundations, is associated with the solution of a number of scientific and technical problems.

Aim. Development of a model and analysis of the thermophysical interaction of the “T-CPT probe-soil” system, taking into account the influence of various factors (soil type, condition and temperature, soil, probing velocity, etc.).

Materials and methods. A comprehensive empirical study of these factors is a highly complex task. Under these conditions, the development of adequate models of such interactions is particularly relevant. This paper presents the development of a model for the thermophysical interaction of a T-CPT probe with thawed and frozen soil during its penetration. For frozen soil, various relationships between frictional heat fluxes and phase transitions are considered, as well as its influence on probe temperature changes.

Results. A model is proposed that explains and predicts the nature of T-CPT probe temperature changes during testing of thawed and frozen soils, taking into account probe and soil characteristics and probing velocity. The model explains the physics and conditions for the occurrence of the “pseudo-anomalous probe cooling effect” during testing of plastic frozen soils.

Conclusion. The thermophysical interaction of the T-CPT probe with frozen soil is more complex than with thawed soil. When testing plastic-frozen soils, the T-CPT probe temperature can not only increase but also decrease. The mechanical interaction of the probe with frozen soil should be considered in conjunction with the thermophysical interaction.

Keyword: cone penetration test with temperature measurement (T-CPT), thermophysical model, heat fluxes, T-CPT probe temperature, pseudo-anomalous probe cooling effect

For citation: Isaev O.N. Cone penetration test with temperature measurement (T-CPT): analysis of the thermophysical interaction of the cone penetrometer with the soil. *Earthquake engineering, Construction safety*, 2026, no. 1, pp. 163–179 [In Russian].

DOI: [10.37153/2618-9283-2026-1-163-179](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2026-1-163-179)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Введение

Разработка методов испытания грунтов температурно-статическим зондированием (Cone Penetration Test with Temperature Measurement – CPT) и интерпретации получаемых данных с целью определения геотехнических характеристик грунтов, используемых при расчете оснований и фундаментов, прежде всего в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, связана с решением ряда научно-технических задач [8].

В первую очередь это задачи исследования теплофизического взаимодействия зонда с грунтом – в процессе испытаний между водом и мерзлым грунтом происходят сложные процессы теплового взаимодействия, зависящие от большого числа различных факторов (вида грунта, его состава и температуры, скорости зондирования, теплофизических свойств грунта и зонда и др.). Полное исследование этих факторов опытным путем является сложной задачей. В этих условиях особую актуальность приобретает разработка моделей такого взаимодействия [1, 3, 5].

Первая попытка изучения теплофизического взаимодействия зонда с грунтом была предпринята С.Е. Гречищевым, А.А. Жигальским, А.А. Шерватяном [2], которые исследовали задачу о движении с постоянной скоростью конусного источника тепла в неограниченной среде. Интенсивность генерации тепла в точке принималась равной мощности, затрачиваемой на трение наконечника зонда о мерзлый грунт. Расчеты показали, что максимальная глубина температурных возмущений перед движущимся источником не превышает 1–2 мм. Этими же авторами была рассмотрена задача о движении конусного источника тепла. Согласно полученным результатам, если начальная температура мерзлого грунта выше, чем -2.2°C , конус может разогреваться до положительных температур. Было показано, что образование талой зоны под конусом зонда практически невозможно. Однако она может образоваться в случае, если

$$Q_w < \vartheta_c i_{tot} \rho_f L_0 \quad (1)$$

где Q_w – интенсивность тепловыделений на поверхности конуса; ϑ_c – скорость движения конусного источника тепла; i_{tot} – суммарная льдистость грунта; ρ_f – плотность мерзлого грунта; L_0 – удельная скрытая теплота фазовых переходов.

Рассмотренная в [2] задача учитывает лишь один тепловой эффект – тепло, выделяемое в результате трения наконечника о мерзлый грунт. Однако при внедрении в пластично-мерзлый грунт зонд может не только нагреваться, но и, как показали экспериментальные исследования авторов статьи [4], охлаждаться. Данное явление ими было названо «эффектом псевдоаномального охлаждения зонда». Оно вызвано тем, что при задвигании вокруг зонда образуется зона повышенного давления, что приводит к локальному понижению температуры за счет плавления порового льда и переходу тонкой призмочки льда к зонду мерзлого грунта в талое состояние, сопровождаемому поглощением тепла.

В статье представлена разработка модели теплофизического взаимодействия зонда с мерзлым грунтом, учитывающая возможность возникновения «эффекта псевдоаномального охлаждения зонда».

Расчетные предпосылки

Рассмотрим задачу теплофизического взаимодействия зонда с мерзлым грунтом. Примем следующие расчетные предпосылки:

- Теплофизические свойства грунта изотропны.
- Грунт находится в природном состоянии с постоянной температурой.
- В начальный момент погружения зонда его температура равна природной температуре грунта.
- Скорость погружения зонда постоянна.
- Работа сил трения грунта о зонд полностью переходит в тепло.
- Теплота, выделяемая (поглощаемая) на границе зонд – грунт, распределяется по формуле Ф. Шарона.
- Получаемое конусом и муфтой трения тепло в их пределах, распределяется равномерно.
- Плотности тепловых потоков определенного типа в пределах соответствующих участков боковой поверхности конуса и муфты трения имеют постоянные значения.

Задавливание зонда в талый грунт

Погружение зонда в результате трения вызывает взаимодействие с грунтом вызывает генерацию тепла и повышение температуры зонда и грунта. Рассмотрим теплофизическое взаимодействие системы «зонд – талый (охлажденный) грунт» при задавливании зонда со скоростью v_c . В результате трения о грунт на поверхности зонда происходит тепловыделение с образованием тепловых потоков, поглощаемых зондом (Q_w^p) и грунтом (Q_w^{th}). Суммарный тепловой поток, выделяемый на поверхности зонда в единицу времени, рассчитывается по формуле:

$$Q_w = Q_w^p + Q_w^{th} = \int_A q_w dA \tag{2}$$

где q_w – плотность теплового потока; dA – площадь элемента поверхности зонда, на котором выделяется тепло.

При зондировании на поверхности зонда имеем тепловые процессы с граничными условиями второго рода – «на поверхности тела задано распределение плотности теплового потока в каждый момент времени» [1]. В пределах конуса и муфты трения тепловыделение равномерно (см. расчетные предпосылки). В установившемся режиме, при неизменных характеристиках грунта, не меняется во времени. Распределение между зондом и грунтом генерируемого при трении тепла можно определить по коэффициенту распределения тепловых потоков $\alpha_{тр}$ [10]:

$$\begin{cases} q_w = q_w^p + q_w^{th} \\ q_w^p = (1 - \alpha_{тр})q_w \\ q_w^{th} = \alpha_{тр}q_w \end{cases} \tag{3}$$

где $\alpha_{тр}$ – доля поступающего в грунт тепла; q_w^p и q_w^{th} – плотности тепловых потоков, идущие на нагрев зонда и грунта.

Согласно формуле Ф. Шарона [10] коэффициент распределения тепловых потоков равен

$$\alpha_{тр} = \frac{\sqrt{\lambda_{th} \rho_{th}}}{\sqrt{\lambda_p c_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_{th} c_{th} \rho_{th}}} \tag{4}$$

где λ_p и λ_{th} – коэффициенты теплопроводности стали и талого (охлажденного) грунта; c_p и c_{th} – удельная теплоемкость стали и талого грунта; ρ_p и ρ_{th} – плотность стали и талого грунта.

Оценим по формуле (4) величину $Q_{тп}$. Известно, что $\lambda_p \approx 33-59 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, $\lambda_{th} \approx 0,6-2,0 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, $C_p \approx 0,46-0,60 \text{ кДж/кг}^\circ\text{С}$, $C_{th} \approx 0,7-1,0 \text{ кДж/кг}^\circ\text{С}$, $\rho_p \approx 7800 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{th} \approx 1300-1700 \text{ кг/м}^3$ [1, 9]. Тогда величина коэффициента $\alpha_{тп} \approx 4-9\%$. Отсюда следует, что лишь малая доля выделяемого тепла поглощается грунтом, основная его часть (91–96 %) идет на нагрев зонда. Данная закономерность обусловлена тем, что $\lambda_p \gg \lambda_{th}$.

Поскольку, согласно принятой предпосылке, плотность теплового потока по точкам боковой поверхности конуса и муфты трения имеет соответствующие постоянные значения, можно записать следующие выражения для тепловых потоков, поглощаемых конусом Q_w^c и муфтой трения Q_w^s :

$$\begin{cases} Q_w^c = q_w^c A_{cl} \\ Q_w^s = q_w^s A_s \end{cases} \quad (5)$$

где q_w^c и q_w^s – плотности тепловых потоков, поглощаемых конусом и муфтой трения; A_{cl} и A_s – площади боковой поверхности конуса и муфты трения.

Величины q_w^c и q_w^s , с учетом коэффициента распределения тепловых потоков $\alpha_{тп}$, можно определить по формулам:

$$\begin{cases} q_w^c = (1 - \alpha_{тп}) k_{тр} \sigma_n^m \cos \alpha \theta_c \\ q_w^s = \alpha_{тп} f_{sv} \sigma_n^m \end{cases} \quad (6)$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трения грунта о зонд; σ_n^m – среднее нормальное давление грунта на поверхности конуса; θ_c – скорость погружения зонда.

Расмотрим погружение со скоростью θ_c зонда (рис. 1) диаметром $2r_0$ и углом вершины конуса 2α . На его поверхности в грунте формируются нормальные и касательные напряжения. Обозначим их средние значения σ_n^m и $\tau_f^m = \sigma_n^m \mu$.

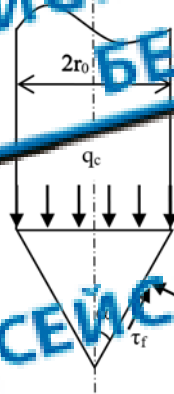


Рисунок 1 – Расчетная схема вдавливания зонда в грунт:

α – половина угла вершины конуса; q_c – удельное сопротивление грунта под конусом; τ_f – касательное напряжение в грунте на поверхности конуса; σ_n – нормальное напряжение в грунте на поверхности конуса; r_0 – радиус зонда.

Figure 1 – Calculation scheme for probe penetration into the soil:
 α – half of the angle of the cone vertex; q_c – the resistivity of the soil under the cone;
 τ_f – tangential stress in the soil on the surface of the cone; σ_n – normal stress in the soil on the surface of the cone; r_0 – radius of the probe half of the angle of the cone vertex

Запишем условие равновесия сил для конуса:

$$A_c q_c = A_{cl} (\sigma_n^m \sin \alpha + k_{тр} \cos \alpha), \quad (7)$$

где $A_c = \pi r_0^2$ – площадь основания конуса; $A_{cl} = \frac{\pi r_0^2}{\alpha}$ – площадь боковой поверхности конуса; r_0 – радиус зонда; $l_0 = \frac{r_0}{\sin \alpha}$ – длина образующей конуса.

Из условия равновесия среднее нормальное напряжение σ_n^m в грунте может быть определено по формуле:

$$\sigma_n^m = \frac{q_c \sin \alpha}{\sin \alpha + k_{тр} \cos \alpha} \quad (8)$$

Подставив (8) в первое уравнение системы (6), получим выражение для плотности теплового потока трения, поглощаемого конусом

$$q_w^c = \frac{(1 - \alpha_{тп}) k_{тр} \sin \alpha \cos \alpha}{\sin \alpha + k_{тр} \cos \alpha} q_c \vartheta \quad (9)$$

Количество фрикционного тепла $\sum Q_w^c$, поглощенного конусом за время задавливания t_v , с учетом расчетных предположений и полученного выражения для q_w^c составляет:

$$\sum Q_w^c = \frac{(1 - \alpha_{тп}) k_{тр} \sin \alpha \cos \alpha}{\sin \alpha + k_{тр} \cos \alpha} q_c A_{cl} \vartheta t_v \quad (10)$$

или с учетом $t_v = \frac{l_v}{v_c}$

$$\sum Q_w^c = \frac{(1 - \alpha_{тп}) k_{тр} \sin \alpha \cos \alpha}{\sin \alpha + k_{тр} \cos \alpha} q_c A_{cl} l_v \quad (11)$$

После завершения стабилизации и вставки зонда до природной температуры грунта начинается очередное (пока не последнее) задавливание зонда, в процессе которого температура конуса увеличится на

$$\Delta\theta_c = \frac{\Sigma Q_c^0}{C_p m_c}, \quad (12)$$

где $\Delta\theta_c = \theta_p - \theta_n$ – повышение температуры конуса при задавливании; θ_c – температура конуса при задавливании; θ_n – природная температура грунта; C_p – удельная теплоемкость стали; m_c – масса конуса.

Подставляя в эту формулу полученные ранее выражения (10) и (11), имеем:

$$\Delta\theta_c = \frac{k_c(1-\alpha_{тп})q_c}{C_p m_c} \quad \text{или} \quad \Delta\theta_c = \frac{k_c(1-\alpha_{тп})q_c A_{cl} l_v}{C_p m_c} \quad (13)$$

где $k_{тп}$ – коэффициент трения талого грунта о зонд; $k_c = \frac{k_{тп} \sin \alpha \cos \alpha}{\sin \alpha + k_{тп} \cos \alpha}$.

Аналогичные выражения можно получить для муфты трения:

$$\Delta\theta_s = \frac{(1-\alpha_{тп})f_s A_s \vartheta c t_{тп}}{C_p m_s} \quad \text{или} \quad \theta_s = \frac{(1-\alpha_{тп})f_s A_s l_v}{C_p m_s} \quad (14)$$

где m_s – масса муфты трения; A_s – площадь боковой поверхности муфты трения.

Из полученных формул следует, что при погружении зонда с постоянной скоростью в талый грунт повышение его температуры в результате трения о грунт прямо пропорционально удельному сопротивлению грунта зондированию и длине пройденного интервала, обратно пропорционально массе и удельной теплоемкости зонда.

На основании полученных формул, в результате действия теплового потока трения, температура конуса θ_c и муфты трения θ_s , через время t_v после начала задавливания, должна составлять

$$\theta_c = \theta_n + \frac{k_c(1-\alpha_{тп})q_c}{C_p m_c} t_v \quad (13.a)$$

$$\theta_s = \theta_n + \frac{(1-\alpha_{тп})f_s A_s l_v}{C_p m_s} \quad (14.a)$$

Повышение температуры зонда по отношению к грунту приводит к образованию температурного градиента между ними. В результате начинается передача тепла в направлении уменьшения температуры (от более теплого тела к более холодному). При этом, что грунтовая среда вблизи конуса имеет постоянную температуру (согласно расчетным предпосылкам, а также тому, что при задавливании грунтовая среда вблизи зонда постоянно обновляется) данный тепловой процесс допустимо рассматривать как стационарную теплопроводность переходного типа – тело с одинаковой температурой во всех точках, равной θ_{p0} , в начальный момент времени $t=0$ погружается в среду с неизменной температурой θ_n . Согласно [1] уравнение описывающее стационарное температурное поле тела для данного случая имеет вид

$$\frac{\theta_{pt} - \theta_n}{\theta_{p0} - \theta_n} = \sum_{n=1}^{\infty} A(\mu_n) U(\mu_n \bar{\xi}) e^{-\mu_n t} \quad (15)$$

где A и U – некоторые функции; μ_n – корни характеристического уравнения $\mu = \mu(B_i)$; $\bar{\xi} = \xi/l$ – безразмерная координата; $B_i = \frac{al}{\lambda}$ – число Био; $F = \frac{at_s}{l^2}$ – число Фурье; l – характерный

линейный размер тела; λ и a – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности тела.

При малых значениях Bi ($Bi < 0.1$), что соответствует данному случаю, температуру тела во всех точках можно рассматривать как одинаковую, уменьшающуюся во времени в соответствии с уравнением [12]:

$$\frac{\theta - \theta_n}{\theta_{p0} - \theta_n} = \exp\left(\frac{-i\alpha p t}{\rho_p c_p l}\right), \quad (16)$$

где $i = 2\pi R l = R$ – для цилиндра (в первом приближении допустимо принять для коэффициента трения $i = 3$ и $l = R$ – для шара (в первом приближении допустимо принять для конуса), ρ_p и c_p – плотность и удельная теплоемкость зонда; θ_{pt} – температура зонда в момент времени t ; θ_{p0} – температура зонда начальная; t – время; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности зонда.

В первом приближении допустимо считать, что влияние передачи тепла из-за температурного градиента на тепловые процессы существенно меньше, чем выделяемое при frictionном взаимодействии тепло. В этом случае снижением температуры можно пренебречь, изменение температуры конуса и муфты трения будет подчиняться уравнениям (13.a), (14.a).

Рассмотрим характер изменения температуры конуса $\Delta\theta_c$ в зависимости от длины интервала вдавливания зонда l_v . С первых секунд вдавливания возникает постоянная величина тепловой поток трения $Q_w^c = const$, вызывающий постепенное повышение температуры конуса и как следствие образование температурного градиента. Возникновение и возрастание температурного градиента приводит к появлению и увеличению теплового потока теплопередачи Q_{hc}^c от конуса к грунту. Поскольку $Q_w^c \gg Q_{hc}^c$ вид графика $\theta_c(l_v)$, с учетом тепловой инерционности зонда, соответствует показанному на рис. 2.

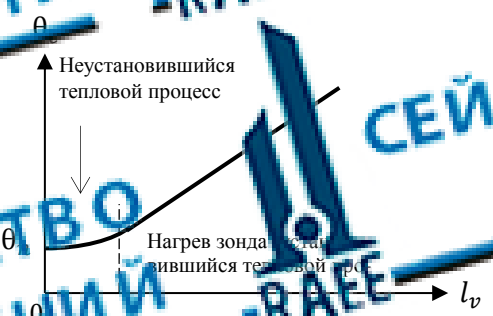


Рисунок 2 – Изменение температуры конуса при вдавливании зонда в талый грунт
 θ_n – природная температура грунта; θ_c – температура конуса;
 l_v – длина интервала зондирования

Figure 2 – Change in cone temperature when the probe is penetrated into thawed soil
 θ_n – the natural temperature of the soil; θ_c – cone temperature; l_v – length of the probing interval

Завдавливание зонда в мерзлом грунте

Мерзлый грунт представляет собой многокомпонентную четырехфазную систему «твердые минеральные частицы (скелет грунта) – поровый лед – поровая вода (незамерзшая вода) – поровый газ» [12]. В 1945 г. Н.А. Цытович сформулировал основной принцип фазового равновесия «поровый лед – поровая вода» мерзлого грунта, согласно которому «В любом мерзлом грунте при любой его отрицательной температуре и природных условиях всегда содержится некоторое, хотя бы и весьма незначительное, количество воды в каждой фазе, находящееся в равновесном состоянии с величиной внешнего воздействия и количественно изменяющейся с изменением последних» [13]. Н.А. Цытович считал, что основными внешними воздействиями являются «изменения отрицательной температуры и величины внешнего давления» [12].

При задавливании зонда в окружающем грунте увеличиваются сжимающие напряжения. Пусть на поверхности конуса измерен в грунте среднее нормальное напряжение σ_n^m . Согласно И.А. Комарову [1] природное давление, действующее в мерзлом грунте, представляет собой сумму давлений на скелет грунта σ_{sk} , поровую воду σ_w и поровый лед σ_L :

$$\sigma_n^m = \sigma_{sk} + [\chi\sigma_w + (1 - \chi)\sigma_L], \quad (17)$$

где χ – коэффициент распределения давлений на поровый лед и незмерзшую воду (изменяется от 0 до 1, подбирается из экспериментальных данных (теоретические модели для его нахождения не являются прогнозными и крайне сложны по структуре) [6]).

Если считать, что твердые фазы грунта (минеральные частицы и поровый лед) работают как единая твердая фаза, на которую передается напряжение $\sigma_{skL} = \sigma_{sk} = \sigma_L$ и поровая вода, из-за ее относительно малого количества и наличия порового газа, почти не воспринимает внешнее давление ($\sigma_{skL} \gg \sigma_w$), тогда можно записать

$$\sigma_n^m = \sigma_{skL} \quad \text{или} \quad \sigma_n^m = \sigma_L. \quad (18)$$

Природное среднее нормальное напряжение в грунте составляет $\sigma_n^m = \frac{1}{3}(2\sigma_{h0} + \sigma_{v0})$. Здесь σ_{v0} – вертикальное напряжение от собственного веса грунта; $\sigma_{h0} = K_0\sigma_{v0}$ – горизонтальное напряжение от собственного веса грунта, где K_0 – коэффициент бокового давления грунта в покое. После задавливания зонда среднее нормальное напряжение в поровом льде увеличивается на величину:

$$\Delta\sigma_L = \sigma_n^m - \frac{\sigma_{v0}}{3}(2K_0 + 1). \quad (19)$$

Как известно, при увеличении давления надду атмосферы температура плавления льда (в свободном объеме) понижается на $0,0075 \text{ } ^\circ\text{C}$ [1]. Это хорошо видно на фазовой диаграмме рис. 3.



Рисунок 3 – Диаграмма «лед – вода – водяной пар», показывающая зависимость фазовых превращений от температуры и давления [7]

Figure 3 – “Ice – water – water vapor” diagram showing the dependence of phase transitions on temperature and pressure [7]

При увеличении давления на σ_L температура плавления льда уменьшается на

$$\Delta\theta_L = k_\sigma\Delta\sigma_L \quad (20)$$

Здесь $k_{\sigma} = 0,075 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{МПа}$ – коэффициент понижения температуры плавления льда. В работе [6] Комаров И.А. утверждает, что данное значение k_{σ} может корректно использоваться только для открытых грунтовых систем, например по отношению «к влагонепроницаемым незасоренным пескам, сложенным крупными фракциями». Большинство же типичных грунтов представляют собой закрытые системы, поэтому величина k_{σ} для них может существенно отличаться. Например, как отмечено в [6], для суглинистых грунтов, в зависимости от гранулометрического и минерального состава, $k_{\sigma} \approx 0,00 \dots 0,83 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{МПа}$. Схожие тенденции понижения температуры замерзания получены группой специалистов в результате экспериментального изучения влияния состава и давления газа на температуру замерзания поровой воды в газонасыщенных породах (песке и супеси) $k_{\sigma} \sim 0,06 \dots 1,25 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{МПа}$ [11].

Подставляя в (20) выражения (8) и (19), получаем:

$$\Delta\sigma_L = k_{\sigma} \left[\frac{q_{c,пл}c}{k_p \cos\alpha} - \frac{\sigma_{vo}}{3} (2K_0 + 1) \right]. \quad (21)$$

Таким образом, на границе «зонд – мерзлый грунт» в общем случае может происходить три теплофизических процесса: первый – тепловыделение за счет фрикционного взаимодействия, второй – теплопоглощение за счет понижения температуры фазовых переходов, третий – теплопередача между зондом и грунтом, вызванная градиентом температуры между ними.

Рассмотрим совместное действие этих процессов.

При погружении зонда в прилегающий грунт возникают сжимающие напряжения. В результате на поверхности зонда, как и в талом грунте, происходит тепловыделение трения с образованием двух тепловых потоков, направленных к зонду (Q_w^p) и грунту (Q_w^f).

Распределение выделяющегося при трении тепла, по аналогии с талым грунтом, можно определить через коэффициент распределения тепловых потоков $\alpha_{тп,f}$ [10].

$$\begin{cases} q_w = q_w^p + q_w^f \\ \alpha_{тп}^p = (1 - \alpha_{тп,f}) q_w^f \\ \alpha_{тп}^f = \alpha_{тп,f} q_w^f \end{cases} \quad (22)$$

где q_w^p и q_w^f – плотность тепловых потоков трения, идущие на нагрев зонда и мерзлого грунта; $\alpha_{тп,f} = \frac{\sqrt{\lambda_f c_f \rho_f}}{\sqrt{\lambda_p c_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_f c_f \rho_f}}$ – доля тепла трения, поступающая в мерзлый грунт.

Оценка коэффициента распределения тепловых потоков $\alpha_{тп,f}$, выполненная по формуле Ф. Шарона, показывает, что для мерзлых грунтов он лежит примерно в том же интервале (4–8 %), что и для талых. Поэтому почти весь тепловой поток трения идет на нагрев зонда.

Выражение для количества тепла трения, поглощаемого конусом, по аналогии с талым грунтом можно записать в виде:

$$\Sigma Q_w^c = k_{cf} (1 - \alpha_{тп}) q_c A_{cl} l_v, \quad (23)$$

где $l_v = \partial c_t = \frac{k_{mp,j}}{k_{mp,j}}$ – коэффициент трения мерзлого грунта; $k_{cf} = \frac{k_{тп,f} \sin\alpha \cos\alpha}{\sin\alpha + k_{тп,f} \cos\alpha}$

При погружении зонда в грунт возникают сжимающие напряжения. Часть в результате зондирования сжимающие торсионные напряжения в льде мерзлого грунта вблизи конуса увеличатся на $\Delta\sigma_L$. Тогда температура плавления льда в грунте уменьшится и составит

$$\sigma_L^p = \theta_L - k_{\sigma} \Delta\sigma_L, \quad (24)$$

где θ_L^n и θ_L – новая и природная температура плавления льда; κ_0 – коэффициент понижения температуры плавления льда.

Когда природная температура мерзлого грунта при зондировании будет равна или выше полой температуры плавления льда ($\theta_n > \theta_L^n$), на поверхности зонда может образоваться прослойка талого грунта. При таянии льда в этой прослойке происходит поглощение тепла. Его распределение можно определить через коэффициент распределения тепловых потоков [10]:

$$\begin{cases} q_{it} = q_{pt}^c + q_{pt}^f \\ q_{pt}^c = (1 - \alpha_{тп,ф}) q_{it} \\ q_{pt}^f = \alpha_{тп,ф} q_{it} \end{cases} \quad (25)$$

где q_{pt}^c и q_{pt}^f – плотности тепловых потоков фазовых переходов, охлаждающих зонд и мерзлый грунт.

Запишем выражения для определения тепловых потоков фазовых переходов для конуса Q_{pt}^c и муфты трения Q_{pt}^{fs}

$$\begin{cases} Q_{pt}^c = q_{pt}^c A_{cl} \\ Q_{pt}^{fs} = q_{pt}^{fs} A_s \end{cases} \quad (26)$$

где q_{pt}^c и q_{pt}^{fs} – плотности тепловых потоков фазовых переходов для конуса и муфты трения.

Найдем общую плотность тепловых потоков фазовых переходов q_{it} . При этом будем считать, что плотности тепловых потоков на поверхности конуса и муфты трения равны. Количество тепла, поглощаемого при таянии льда в единицу объема грунта, определяется по формуле:

$$l_v = L_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d \quad (27)$$

где $L_0 = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг – удельная теплота фазовых превращений вода-лед; W_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта; W_w – влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды; ρ_d – плотность сухого (скелета) грунта.

Пусть толщина слоя фазовых переходов на поверхности зонда имеет толщину δ_{pt} . Тогда плотность тепловых потоков фазовых переходов от конуса q_{pt}^c и прослойку составит:

$$q_{pt}^c = (1 - \alpha_{тп,ф}) \frac{L_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d \delta_{pt}}{h_c} \quad (28)$$

где h_c – высота конуса.

Найдем количество тепла ΣQ_{pt}^c , отданного конусом. С учетом расчетных предпосылок, полученного нами в выражении (28) и принимая $q_{pt}^c = const$ имеем:

$$\Sigma Q_{pt}^c = (1 - \alpha_{тп,ф}) \frac{L_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d \delta_{pt} \theta_{cl}}{h_c} \quad (29)$$

или с учетом $t_v = l_v / \theta_c$

$$Q_{it}^c = (1 - \alpha_{тп,ф}) \frac{L_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d \delta_{pt}}{h_c} A_{cl} \theta_{cl} \quad (30)$$

В зависимости от разовидности температуры и характеристик мерзлого грунта возможны различные соотношения тепловых потоков трения Q_w^c и фазовых переходов Q_{pt}^c , а также характер изменения температуры конуса в процессе завливания. Рассмотрим их. Как и при анализе зондирования мягких грунтов будем полагать, что тепловой поток теплопередачи между конусом и грунтом Q_{tc}^c , возникающий в результате появления температурного градиента, будет значительно больше разницы тепловых потоков трения и фазовых переходов ($|Q_w^c - Q_{pt}^c| \gg Q_{tc}^c$).

Вариант А. Pt-слой фазовых переходов не формируется ($\Sigma Q_{pt} = 0$). Природная температура грунта ниже температуры начала замерзания мерзлого грунта под конусом ($\theta_n < \theta_L^n$).

Как и при зондировании мягкого грунта, в результате фрикционного взаимодействия ($\Sigma Q_w^c \neq 0$) температура конуса повышается пропорционально длине интервала зондирования (рис. 4). При больших значениях q_c и высокой отрицательной природной температуре мерзлого грунта зонд может разогреваться до положительных температур. И наоборот, при малых значениях q_c и низкой отрицательной природной температуре мерзлого грунта температура зонда будет отрицательной.

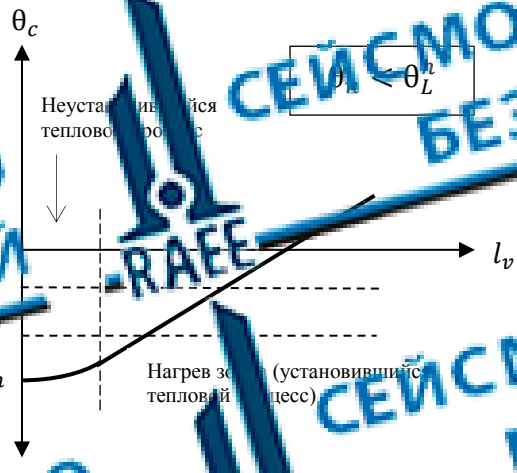


Рисунок 4 – Характер изменения температуры конуса при завливании зонда в мерзлый грунт

Вариант А. Pt-слой фазовых переходов не формируется, $\delta_{pt} = 0$

θ_n – природная температура грунта; θ_L и θ_L^n – природная и новая температура плавления льда вблизи конуса; δ_{pt} – толщина слоя фазовых переходов на поверхности конуса; l_v – длина интервала зондирования

Figure 4 – The nature of the change in cone temperature when the probe is penetrated into frozen ground

Variant A. The Pt-layer of phase transitions is not formed, $\delta_{pt} = 0$

θ_n – natural temperature of the soil; θ_L and θ_L^n – natural and new melting temperatures of ice near the cone; δ_{pt} – thickness of the layer of phase transitions on the surface of the cone; l_v – length of the sounding interval

Вариант Б. Формируется pt-слой фазовых переходов ($\Sigma Q_{pt}^c \neq 0$) толщиной δ_{pt} . Природная температура грунта выше или равна температуре начала замерзания мерзлого грунта под конусом ($\theta_n \geq \theta_L^n$).

Вариант В.1. Маловероятный случай – формируется pt-слой критической толщины $\delta_{pt} = \delta_{pt,cr}$ при котором поглощаемое конусом тепло трения и отдаваемое тепло фазовых переходов равны ($\Sigma Q_w^c = \Sigma Q_{pt}^c$). Температура конуса в этом случае не меняется ($\Delta\theta_c = 0$, рис. 5).



Рисунок 5 – Изменение температуры конуса при задавливании зонда в мерзлый грунт.

Вариант В.1. Pt -слой фазовых переходов формируется, $\delta_{pt} = \delta_{pt,cr}$

θ_n – природная температура грунта; θ_L и θ_L^n – природная и новая температура плавления льда вблизи конуса; δ_{pt} и $\delta_{pt,cr}$ – образованная и критическая толщина слоя фазовых переходов на поверхности конуса; l_v – длина интервала зондирования

Figure 5 – Change in cone temperature when the probe is penetrated into frozen soil

Variant B.1. The Pt -layer of phase transitions is formed, $\delta_{pt} = \delta_{pt,cr}$

θ_n – natural temperature of the soil; θ_L and θ_L^n – natural and new melting temperatures of ice near the cone; δ_{pt} and $\delta_{pt,cr}$ – formed and critical thickness of the phase transition layer on the surface of the cone; l_v – length of the sounding interval

Очевидно, что равенство тепловых потоков может иметь место при определенной критической толщине pt -слоя фазовых переходов $\delta_{pt,cr}$. Найдем ее. На основании равенства $\Sigma Q_w^c = \Sigma Q_{pt}^c$ имеем:

$$\delta_{pt,cr} = \frac{k_{p,f} \sin \alpha \cos \alpha}{(\sin \alpha + k_{p,f} \cos \alpha) L_0 (2\theta_n - \theta_L + \theta_L^n)} l_v \quad (31)$$

По данной формуле были выполнены оценочные расчеты критической толщины слоя фазовых переходов при зондировании глинистых незакаленных мерзлых грунтов при природной температуре грунта $\theta_n = -2...-0,3$ °С. В расчетах использовались обобщенные значения физических свойств мерзлых грунтов опытных площадок, расположенных на многолетне-мерзлых грунтах, а также зависимости показателей сопротивления грунта зондированию от температуры грунта. Результаты оценки показали, что критическая толщина слоя фазовых переходов под конусом незначительна ($\delta_{pt,cr} \approx 0,1$ мм).

Вариант В.2. Поглощаемое конусом тепло больше отдаваемого тепла фазовых переходов ($\Sigma Q_w^c > \Sigma Q_{pt}^c$). В результате конус будет нагреваться ($\Delta\theta_c > 0$, рис. 6). Тепловое взаимодействие при данном варианте схоже с тем, что происходит при отсутствии pt -прослойки. Отличия – разогрев зонда происходит на меньшую величину из-за охлаждающего эффекта pt -прослойки.

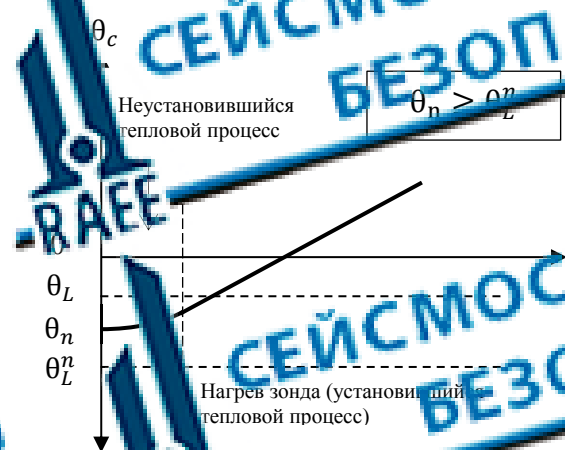


Рисунок 6 – Изменение температуры конуса при задавливании зонда в мерзлый грунт.

Вариант В.2. Pt -слой фазовых переходов формируется, $\delta_{pt} < \delta_{pt,cr}$.
 θ_n – природная температура грунта; θ_L и θ_L^n – природная и новая температура плавления льда с поверхности конуса; $\delta_{pt,cr}$ – образуемая критическая толщина слоя фазовых переходов на поверхности конуса; l_v – длина интервала зондирования.

Figure 6 – Change in cone temperature when the probe is penetrated into frozen soil

Variant B.2. The Pt -layer of phase transitions is formed $\delta_{pt} < \delta_{pt,cr}$.
 θ_n – natural temperature of the soil; θ_L and θ_L^n – natural and new melting temperatures of ice near the cone; δ_{pt} and $\delta_{pt,cr}$ – are the formed and critical thickness of the phase transition layer on the surface of the cone; l_v – length of the sounding interval

В результате действия обоих тепловых потоков, в конце интервала зондирования l_v , конус получит тепло

$$\Sigma Q^c = \Sigma Q_w^c - \Sigma Q_{pt}^c = (1 - \alpha_{тп,ф}) A_{cl} l_v \left[k_{cf} q_c - \frac{L_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d \delta_{pt}}{h_c} \right] \quad (32)$$

и его температура увеличится на

$$\Delta \theta_c = \frac{\Sigma Q^c - \Sigma Q_{pt}^c}{c_p m_c} = \frac{(1 - \alpha_{тп,ф}) A_{cl} l_v}{c_p m_c} \left[k_{cf} q_c - \frac{L_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d \delta_{pt}}{h_c} \right] \quad (33)$$

Вариант В.3. Поглощаемое конусом тепло трения меньше сдвигаемого тепла фазовых переходов ($\Sigma Q_w^c < \Sigma Q_{pt}^c$). В результате конус будет охлаждаться ($\Delta \theta_c < 0$, рис. 7) – его температура будет ниже природной температуры грунта ($\theta_c < \theta_n$).

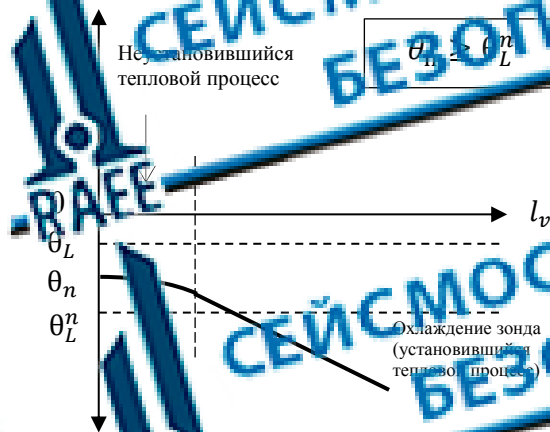


Рисунок 7 – Изменение температуры конуса при задавливании зонда в мерзлый грунт
 Вариант В3. Pt-слой фазовых переходов формируется, $\delta_{pt} > \delta_{pt,cr}$.
 θ_n – природная температура грунта; θ_L и θ_L^n – природная и новая температура плавления льда вблизи конуса; δ_{pt} и $\delta_{pt,cr}$ – образуемая и критическая толщина слоя фазовых переходов на поверхности конуса; l_v – длина интервала зондирования.

Figure 7 – Change in cone temperature when the probe is penetrated into frozen soil

Variant B3. The Pt-layer of phase transitions is formed $\delta_{pt} > \delta_{pt,cr}$

θ_n – natural temperature of the soil; θ_L and θ_L^n – natural and new melting temperatures of ice near the cone; δ_{pt} and $\delta_{pt,cr}$ – are the formed and critical thickness of the phase transition layer on the surface of the cone; l_v – length of the sounding interval

Несобычный эффект охлаждения зонда при задавливании в мерзлый грунт впервые был обнаружен в 1980-х годах в процессе полевых испытаний автором статьи и назван «эффект псевдоаномального охлаждения зонда».

В результате действия обоих тепловых процессов, в конце интервала зондирования l_v , конус отдаст тепло

$$\Sigma Q^c = \Sigma Q_{pt}^c - \Sigma Q_{cl}^c = (1 - \alpha_{trf}) A_{cl} l_v \left[\frac{L_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d \delta_{pt}}{h_c} - k_{cf} q_c \right] \quad (34)$$

и его температура понизится на

$$\Delta \theta_c = \frac{\Sigma Q_{pt}^c - \Sigma Q_{cl}^c}{c_p m_c} = \frac{(1 - \alpha_{trf}) A_{cl} l_v}{c_p m_c} \left[\frac{L_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d \delta_{pt}}{h_c} - k_{cf} q_c \right]. \quad (35)$$

Аналогичные выражения можно получить и для случая трения. Они будут несколько отличаться от полученных для конуса, но их характер и общие закономерности будут идентичны.

Выводы

1. Проведенные исследования позволили разработать теплофизическую модель «зонд – грунт», описывающую взаимодействие задавливаемого с постоянной скоростью зонда с талым (охлажденным) и мерзлым грунтом, позволяющую моделировать изменение температуры зонда.

2. Модель учитывает равномерное распределение тепловых потоков, генерируемых (поглощаемых) на границе зонда с грунтом, геометрические размеры зонда, физические и теплофизические характеристики зонда и грунта, скорость, длительность (длину) зондирования.

3. Согласно модели, при погружении с постоянной скоростью зонда в талый грунт повышение его температуры будет пропорционально сопротивлению грунта зондированию, скорости, длительности (длине зондирования) зондирования.

4. На контакте зонда с мерзлым грунтом могут возникнуть два взаимно противоположных тепловых процесса. В зависимости от их суммарного воздействия температура зонда может повышаться или понижаться («эффект псевдоаномального охлаждения зонда»).

Первый процесс – генерация тепла в результате frictionного взаимодействия зонда с мерзлым грунтом, вызывающая повышение температуры зонда.

Второй процесс – поглощение тепла в результате понижения температуры плавления льда в мерзлом грунте, вызывающая понижение температуры зонда. Процесс обусловлен тем, что при зондировании в прилегающей к зонду мерзлом грунте появляется зона повышенного давления, вызывающая понижение температуры плавления льда. Если в зоне повышенного давления температура фазовых переходов «вода–лед» становится ниже природной температуры грунта, мерзлый грунт переходит в талое состояние.

Список литературы

1. Аметистов Б.В. Тепло- и массообмен. Газотехнический эксперимент. Справочник / Б.В. Аметистов, В.А. Григорьев, А.Т. Емцев и др. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
2. Гречищев С.Е. Теоретические и экспериментальные исследования поля температур и напряжений под коническим пенетрометром в мерзлом грунте / С.Е. Гречищев, А.А. Жигульский, Шарбалин А.А. // Тез. докл. Всесоюз. совещ. по мерзлотведению / МГУ. М., 1970. С. 142–143.
3. Ершов Э.Д. Общая геокриология / Э.Д. Ершов. М.: МГУ, 2002. 683 с.
4. Исаев О.Н. Идентификация талого и мерзлого состояний грунтов методом статического зондирования / О.Н. Исаев // Материалы IX международного симпозиума «Проблемы инженерного мерзлотведения». г. Мирный. 2003. С. 63–67.
5. Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах / И.А. Комаров. М.: Научный мир, 2003. 608 с.
6. Комаров И.А. Термодинамическое описание фазового и химического разложения влаги в дисперсных мерзлых и промерзающих грунтах. Часть 1 // *Известия геологической службы (Госгеолтехиздат)*. 2020. Том XV. № 1. С. 52–68. <https://doi.org/10.25296/1993-0562010-15-1-52-68>.
7. Кошкин Н.И. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. И. Ширкевич. М.: Наука, 1975. 245 с.
8. Рыжков И.Б. Статическое зондирование грунтов / И.Б. Рыжков, С.Н. Исаев. М.: АСВ, 2010. 496 с.
9. Трофимов В.П. Грунтоведение / В.П. Трофимов. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
10. Чичинадзе А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
11. Чувиллин Е.М. Экспериментальное изучение влияния состава и давления газа на температуру замерзания поровой воды в газонасыщенных породах / Е.М. Чувиллин, Д.А. Давлетшина, Б.А. Буханов, С. И. Гребенкин, В. А. Истомина, Л. В. Бергеева, К. Бадет, Ю.В. Станиславская // *Криосфера земли*. 2019. Т. 23(1). № 5. С. 49–57.
12. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. М.: Высшее образование, 1973. 448 с.
13. Цытович Н.А. К теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах. *Известия Академии наук СССР. Серия географическая и геофизическая*. 1945. Том 9. № 5. С. 493–502.

References

1. Ametistov E.V. Teplo- i massoobmen. Teplot-khicheskii eksperiment. Spravochnik / E.V. Ametistov, V.A. Grigor'ev, B. Emcev i dr. M.: Energoizdat, 1982. 512 p.
2. Grechishchev S.E. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya polya temperatur i napryazhenij pod konicheskim poverkhnost'nyim merzlym gruntom v merzлом grunte / S.E. Grechishchev, A. X. Zingul'skij, Sha-bayev A.A. Tez. dokl. vsesoyuzn. soveshch. po merzlotovedeniya / MGU. M., 1970. Pp. 42–44.
3. Ershov E.D. Obshchaya geokriologiya / E.D. Ershov. M.: MGU, 2002. 683 p.
4. Isaev O.N. Identifikatsiya talogo i merzlogo sostoyaniy gruntov metodom staticheskogo zondirovaniya / O.N. Isaev. Materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Problemy in-zhenernogo merzlotovedeniya». S. Mirnyj, 2011. Pp. 63–67.
5. Komarov I.A. Termodynamika i teplo- i massoobmen v dispersnykh merzlykh porodah / I.A. Komarov. M.: Nauchnyj mir, 2003. 608 p.
6. Komarov I.A. Termodynamicheskie ustanie fazovogo i himicheskogo ravnovesiya vagi i dispersnykh merzlykh i promerzayushchikh gruntah. Chast' 1. *Inzhenernaya geologiya*, 2020, vol. XV, no. 1, pp. 52–68. <https://doi.org/10.2529/1993-5056-2020-15-1-52-68>.
7. Koshkin N.I. Spravochnik po elementarny fizike / N.I. Koshkin, M.G. Shirkevich. M.: Nauka, 1975. 245 p.
8. Ryzhkov I.B. Staticheskoe zondirovaniye gruntov / I. B. Ryzhkov, O. N. Isaev. M.: ASV, 2010. 496 p.
9. Trofimov V.T. Cruntovedenie / V. T. Trofimov. M.: Izd-vo MGU, 2005. 1024 p.
10. Chichinadze A.V. Osnovy kriologii (germetiches, smazka) / A.V. Chichinadze. M.: Mashinostroyeniye, 2001. 664 p.
11. Chuvilin E.M. Eksperimentalnoye izuchenie vliyaniya sostava i davleniya gaza na temperaturu zmerzaniya porozh v vody v gazonasyschennykh porodah / E.M. Chuvilin, D.A. Davletshina, B.A. Pukanov, S.I. Grebenkin, V.A. Istomin, I.V. Sergeeva, K. Badec, Yu.V. Staniovskaya. *Khmosfera zemli*, 2019, vol. XXIII, no 5, pp. 41–51.
12. Tsytoich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov / N.A. Tsytoich. M.: Vysshaya shkola, 1973. 448 p.
13. Tsytoich N.A. K teorii talenogo sostoyaniya vody v merzlykh gruntah. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*, 1945, no. 9, no. 5, pp. 493–502.

Сведения об авторе / Information about the author

Исаев Олег Николаевич, кандидат технических наук, заведующий сектором геотехники линейных подземных сооружений лаборатории №35, НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»

Oleg N. Isaev, Cand. Sci. (Engineering), Head of Geotechnics of linear underground structures Sector of Laboratory No. 35, NIIOSP named after N.M. Gersvanov JSC «Research Center «Construction»