

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА КОНУСНЫМ ЗОНДОМ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ НАГРЕВА

О.Н. ИСАЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Россия

## Аннотация

*Введение.* Теплофизические свойства грунта могут быть определены в лабораторных и полевых условиях. Полевые методы более точные, поскольку выполняются при минимальных нарушениях природной структуры, теплового и влажностного режима грунта. Наиболее распространенными являются зондовые методы, основанные на внедрении источника тепла в грунт и измерении во времени температуры прилегающего грунта с помощью установленного в зонд температурного датчика. Одним из наиболее перспективных направлений разработки методов определения теплофизических свойств многолетнемерзлых и талых грунтов является использование метода термостатического зондирования (НТ-СРТ) – статического зондирования с использованием зондов, оснащенных нагревательным устройством и термодатчиком. Данный вопрос требует проведения комплекса исследований, прежде всего разработки теплофизической модели взаимодействия конусного зонда постоянной мощности нагрева с грунтом.

*Цель.* Разработка теплофизической модели определения коэффициента теплопроводности грунта конусным зондом постоянной мощности нагрева.

*Материалы и методы.* Аналитическая теплофизическая модель разработана с учетом положений теории теплообмена. При разработке модели приняты расчетные предпосылки: теплофизические свойства грунта изотропны и постоянны; при нагреве фазовые превращения в грунте отсутствуют; теплофизические свойства грунта не изменяются; конус нагревается равномерно и др.

*Результаты.* Получена аналитическая **модель в осесимметричной постановке**, позволяющая определить коэффициент теплопроводности грунта конусным зондом постоянной мощности нагрева. Результаты численных и лотковых экспериментов подтвердили корректность и возможность применения разработанной аналитической модели для определения коэффициента теплопроводности мерзлого грунта при термостатическом зондировании НТ-СРТ зондом.

*Выводы.* На основе анализа теплофизического взаимодействия генерирующего тепловой поток малой мощности конусного зонда с талым и мерзлым (без оттаивания) грунтом получено аналитическое решение, позволяющее определять коэффициент теплопроводности грунта по термограмме нагрева конуса и тепловому коэффициенту зонда.

**Ключевые слова:** конус, зонд, грунт, нагрев, теплофизическая модель, термостатическое зондирование, температура

**Для цитирования:** Исаев О.Н. Теплофизическая модель для определения коэффициента теплопроводности грунта конусным зондом постоянной мощности нагрева // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 1(48). С. 146–154. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-146-154](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-146-154)

## 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.

Поступила в редакцию 14.01.2026

Поступила после рецензирования 16.02.2026

Принята к публикации 17.02.2026

## THERMOPHYSICAL MODEL FOR DETERMINING THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF SOIL BY A CONE PROBE OF CONSTANT HEATING POWER

O.N. ISAEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov (NIIOSP) of JSC Research Center "Construction", Ryazansky Prospekt, 59, Moscow, 109428, Russia

**Abstract**

*Introduction.* The thermophysical properties of soil can be determined in laboratory and field conditions. Field methods are more accurate because they are performed with minimal disturbance to the natural structure and thermal and moisture conditions of the soil. The most common are probe methods based on the introduction of a heat source into the soil and the measurement of the adjacent soil temperature over time using a temperature sensor installed in the probe. One of the most promising areas for developing methods for determining the thermophysical properties of permafrost and thawed soils is the use of the thermostatic probe method (HT-CPT) – static probing using probes equipped with a heating device and a temperature sensor. This issue requires a comprehensive study, primarily the development of a thermophysical model for the interaction of a cone probe with constant heating power with the soil.

*Aim.* Development of a thermophysical model for determining the thermal conductivity coefficient of soil using a cone probe with constant heating power.

*Materials and methods.* The analytical thermophysical model was developed taking into account the fundamental principles of heat transfer theory. The following calculation assumptions were adopted in developing the model: the soil's thermophysical properties are isotropic and constant; there are no phase transitions in the soil upon heating; the soil's thermophysical properties do not change; the cone heats uniformly, etc.

*Results.* An analytical model was developed that allows one to determine the thermal conductivity of soil using a cone probe with constant heating power. The results of numerical and flume experiments confirmed the validity and applicability of the developed analytical model for determining the thermal conductivity of frozen soil during thermostatic probing with an HT-CPT probe.

*Conclusions.* Based on an analysis of the thermophysical interaction between a cone probe generating a low-power heat flux and thawed and frozen (without thawing) soil, an analytical solution was obtained that allows one to determine the soil's thermal conductivity from the cone heating thermogram and the probe's thermal coefficient.

**Keywords:** cone, probe, soil, heating, thermophysical model, cone penetration with temperature measurement and heating, temperature

**For citation:** Isaev O.N. Thermophysical model for determining the thermal conductivity coefficient of soil by a cone probe of constant heating power. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*, 2026, 1(48), pp. 146–154. [In Russian] [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-146-154](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-146-154)

**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.

Received 14.01.2026

Revised 16.02.2026

Accepted 17.02.2026

## Введение

При выполнении теплотехнических расчетов оснований зданий и сооружений, возводимых на многолетнемерзлых грунтах, требуется знание теплофизических свойств грунтов [1, 3, 6, 7, 8, 9]. Наиболее точно они могут быть определены в лабораторных или полевых условиях [4, 5, 6]. При отсутствии опытных данных их берут по таблицам из действующих нормативных документов или рассчитывают по эмпирическим формулам. Табличные и расчетные методы имеют общий недостаток – в качестве исходных данных требуется знание целого набора характеристик мерзлого грунта, что возможно только при отборе образцов и проведении комплексных лабораторных исследований.

Согласно Ершову Э.Д. [4] теплофизические характеристики грунтов и горных пород целесообразно определять в условиях естественного залегания и при минимальных нарушениях структуры, теплового и влажностного режима массива.

Всем этим требованиям соответствуют полевые методы. Наибольшее распространение среди них получили зондовые методы. Их «принцип действия состоит в том, что в исследуемую среду внедряют источник тепла – зонд, и рассматривают вызываемое им изменение во времени температуры окружающей среды» [4]. Они отличаются минимальным механическим и тепловым воздействием на исследуемый грунт из-за небольших размеров зонда и малого времени измерения (5–20 мин).

По принципу действия зондовые методы классифицируются следующим образом [10]: изотермические зонды; зонды постоянной мощности нагрева; зонды с мгновенными источниками тепла; зонды остывающего типа.

По форме зонды могут быть плоскими, цилиндрическими, сферическими. При исследовании горных пород наибольшее распространение получили цилиндрические и плоские зонды [4]. Все три вида основаны на закономерностях и аналитических моделях изменения температурного поля вокруг имеющего определенную форму источника постоянной мощности, расположенного в грунте. Наиболее широко распространенной модификацией является цилиндрический зонд постоянной мощности. Он предназначен для определения теплопроводности талых и мерзлых грунтов в поверхностном слое и шурфе. Зонд этого и других типов для исследования грунтов в массиве, до последнего времени не исследовался и не применялся.

Первые ручные цилиндрические зонды (из-за малого диаметра часто называемые игольчатыми) постоянной мощности нагрева появились в середине прошлого века. Один из первых зондов такого типа был разработан в 1960-х годах в Институте мерзлотоведения СО АН СССР В.М. Марушевичем. Аналогичная конструктивная схема и принцип работы у современных цилиндрических зондов постоянной мощности. Их общие особенности: ручной метод внедрения в исследуемую среду, малый диаметр ( $d_c = 1 \dots 5$  мм), ограниченная длина (2,5–100  $d_c$ ), использование тонкостенных стальных трубок для размещения термодатчика и нагревателя.

Перспективным направлением разработки методов определения теплофизических свойств многолетнемерзлых и талых грунтов в условиях естественного залегания является применение метода термостатического зондирования (НТ-СРТ) – статического зондирования с использованием зондов, оснащенных нагревательным устройством и термодатчиком, располагаемыми в конусе зонда. Первые зонды подобного типа появились в 1980-х годах в НИИОСП им. Н.М. Герсеева (г. Москва) и НИИпромстрой (г. Уфа). Нагрев грунта в них осуществлялся конусом зонда.

Применение конусного зонда постоянной мощности нагрева (в том числе НТ-СРТ зонда) для определения теплопроводности грунта до настоящего времени не исследовалось. Отсутствует и соответствующая теплофизическая модель взаимодействия конусного зонда с грунтом. Ниже представлено полученное автором решение для указанной модели в осесимметричной постановке.

## Расчетные предпосылки

При разработке тепловой модели взаимодействия конусного зонда постоянной мощности нагрева с грунтом приняты следующие расчетные предпосылки:

- теплофизические свойства грунта изотропны и постоянны;
- грунт является неограниченной средой;
- при нагреве фазовые превращения в грунте отсутствуют (температура мерзлого грунта всегда ниже температуры фазовых переходов); теплофизические свойства грунта (удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности) не изменяются;
- поток тепла, выделяемый конусом на вышележащую часть наконечника зонда (муфта трения, тензоэлементы), не передается;
- конус нагревается равномерно, плотность генерируемого на всей его боковой поверхности тепла равна и постоянна;
- в начальный момент температура конуса равна температуре грунта;
- теплообмен между поверхностью конуса и грунтом, вызванный градиентом температур между ними, подчиняется закону Ньютона–Рихмана.

## Разработка тепловой модели взаимодействия конусного зонда постоянной мощности нагрева с грунтом

Рассмотрим расположенный в грунте с удельной теплоемкостью  $C_s$ , коэффициентом теплопроводности  $\lambda_s$ , коэффициентом температуропроводности  $a_s$ , сплошной конус радиусом основания  $r_0$ , высотой  $h_s$ , массой  $m_s$ , удельной теплоемкостью  $C_c$ , коэффициентом теплопроводности  $\lambda_c$ , коэффициентом температуропроводности  $a_c$ . Коэффициент теплоотдачи от конуса в грунт составляет  $\alpha_c$ .

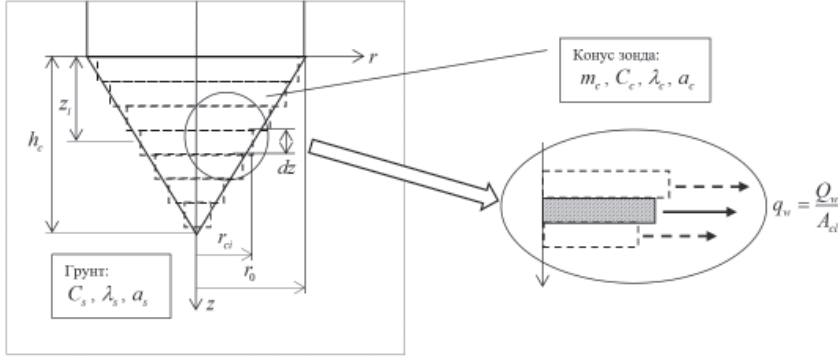
На боковой поверхности конуса в грунт в единицу времени выделяется тепловой поток  $Q_w$ , равный

$$Q_w = q_w A_{cl} \quad (1)$$

где  $Q_w$  – мощность нагрева;  $q_w$  – плотность теплового потока (количество тепла, проходящего через единицу площади за единицу времени);  $A_{cl}$  – площадь боковой поверхности конуса. В нашем случае половина угла при вершине конуса  $\alpha = 30^\circ$ , поэтому формулу можно записать в виде

$$Q_w = 2q_w \pi r_0^2. \tag{1.a}$$

Представим конус в виде совокупности бесконечно большого количества ( $k \rightarrow \infty$ ) дисков очень малой толщины, сложенных таким образом, чтобы они все заполняли и вписывались в конус, а общий объем стремился к объему конуса (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема конуса зонда, генерирующего тепловой поток постоянной мощности нагрева  
**Fig. 1.** Diagram of the probe cone generating a heat flow of constant heating power

Согласно принятым предпосылкам, температура всех дисков в любой момент времени одинакова и равна  $\theta_c$ . Рассмотрим расположенный на расстоянии  $z_i$  элементарный  $i$ -й диск радиусом  $r_{ci}$  и толщиной  $dz$ . Пусть на его боковой поверхности в единицу времени выделяется тепловой поток

$$Q_{wi} = q_w (2\pi r_{ci}) dz. \tag{2}$$

Учитывая, что

$$r_{ci} = r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c}, \tag{3}$$

данное равенство можно записать в виде

$$Q_{wi} = q_w \left( 2\pi r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right) dz. \tag{4}$$

Применим к элементарному  $i$ -му диску толщиной  $dz$  решение I. Н. Blackwell [2] для цилиндра, выделяющего в неограниченную среду тепловой поток постоянной мощности, учитывающее закон Ньютона–Рихмана.

$$\theta_{ci}(t) \approx K_1 \ln t + K_2 + \frac{1}{t} (K_3 \ln t + K_4), \tag{5}$$

где  $\theta_{ci}(t)$  – температура  $i$ -го диска в момент времени  $t$ ;

$$K_1 = \frac{q_w r_0 (h_c - z_i)}{2\lambda_s h_c}$$

$$K_2 = \frac{q_w r_0 (h_c - z_i)}{2\lambda_s h_c} \left[ \ln a_s - 2 \ln \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right) + \ln 4 - \gamma + \frac{2\lambda_s}{\alpha_c \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right)} \right];$$

$$K_3 = \frac{q_w r_0 (h_c - z_i)}{4\lambda_s h_c} \left[ \frac{\left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right)^2}{a_s} - \frac{m_c c_c}{\pi \lambda_s} \right];$$

$$K_4 = \frac{q_w r_0 (h_c - z_i)}{2 \lambda_s h_c} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \frac{\left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right)^2}{a_s} - \frac{m_c c_c}{\pi \lambda_s} \right] \left[ \ln a_s - 2 \ln \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right) + \ln 4 - \gamma \right] + \frac{\left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right)^2}{2 a_s} - \frac{m_c c_c}{\pi \alpha_c \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right)} \right\};$$

$\gamma = 0.5772$  – постоянная Эйлера–Маскерони.

В правой части формулы (5), с течением времени нагрева ( $t \rightarrow \infty$ ), левое выражение стремится к бесконечности ( $\lim_{t \rightarrow \infty} (K_1 \ln t + K_2) = \infty$ ), в то время как правое стремится к нулю ( $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} (K_3 \ln t + K_4) = 0$ ). Последнее можно проверить, используя правило Лопиталья для предела отношения двух функций.

В связи с этим, очевидно, что начиная с определенного момента времени будет справедливо соотношение

$$(K_1 \ln t + K_2) \gg \frac{1}{t} (K_3 \ln t + K_4), \tag{6}$$

Поэтому выражением  $\frac{1}{t} (K_3 \ln t + K_4)$  можно пренебречь и формула (5) примет вид

$$\theta_{ci}(t) \approx \frac{q_w r_0 (h_c - z_i)}{2 \lambda_s h_c} \ln t + \frac{q_w r_0 (h_c - z_i)}{2 \lambda_s h_c} \left[ \ln a_s - 2 \ln \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right) + \ln 4 - \gamma + \frac{2 \lambda_s}{\alpha_c \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right)} \right] \tag{7}$$

Используя это уравнение, можно получить среднюю температуру конуса, выделяющего через свою боковую поверхность в неограниченную среду тепловой поток постоянной мощности. Для этого вновь рассмотрим конус, состоящий из бесконечно большого количества дисков очень малой толщины  $dz$  (рисунок 1). Полагая, в первом приближении, что теплообмен между дисками осуществляется мгновенно, среднюю температуру конуса  $\theta_c$  в момент времени  $t$  можно определить по формуле

$$\theta_c = \frac{\int_0^{h_c} \theta_{ci}(z) S_{ci}(z) dz}{V_c}, \tag{8}$$

где  $\theta_{ci}$  – температура  $i$ -го диска конуса;  $V_c = \frac{1}{3} \pi r_0^2 h_c$  – объем конуса;  $S_{ci} = \pi r_{ci}^2 = \pi \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right)^2$  – площадь  $i$ -го диска конуса;  $r_0$  и  $h_c$  – радиус основания и высота конуса.

Подставив формулу (7) в (8) получаем

$$\theta_c \approx \frac{\ln t}{\lambda_s} A + K_5, \tag{9}$$

где  $A = \frac{3 q_w r_0}{2 h_c^4} \int_0^{h_c} (h_c - z_i)^3 dz$

$$K_5 = \frac{3 q_w r_0}{2 \lambda_s h_c^4} \int_0^{h_c} \left[ \ln a_s - 2 \ln \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right) + \ln 4 - \gamma + \frac{2 \lambda_s}{\alpha_c \left( r_0 \frac{h_c - z_i}{h_c} \right)} \right] (h_c - z_i)^3 dz.$$

Параметры  $A$  и  $K_5$  не зависят от времени нагрева  $t$ , по отношению к нему являются константами. Параметр  $A$  будем называть тепловым коэффициентом зонда. Если измерения температуры конуса  $\theta_{c1}$  и  $\theta_{c2}$  выполнять в моменты времени нагрева  $t_1$  и  $t_2$  (рисунок 2), то на основе формулы (9), можно записать

$$\theta_c(t_2) - \theta_c(t_1) = \frac{A}{\lambda_s} (\ln t_2 - \ln t_1). \quad (10)$$

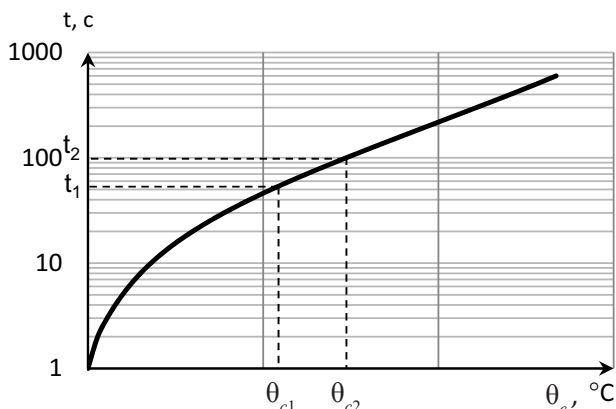


Рис. 2. График изменения температуры конуса  $\theta_c$  при нагреве грунта (для мерзлого без оттаивания) зондом с постоянной мощностью нагрева

Fig. 2. Graph of the temperature change of the cone  $\theta_c$  when the soil is heated (for frozen without thawing) by a probe with constant heating power

Формулу (9) можно использовать для расчета коэффициента теплопроводности грунта

$$\lambda_s = A \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{\theta_c(t_2) - \theta_c(t_1)}. \quad (11)$$

Полученная формула для расчета коэффициента теплопроводности обладает рядом особенностей:

1) Формула справедлива только начиная с определенного критического времени нагрева  $t_0$ , когда  $(K_1 \ln t + K_2) \gg \frac{1}{t} (K_3 \ln t + K_4)$ , при  $t \geq t_0$ . Поскольку коэффициенты  $K_1, K_2, K_3, K_4$ , зависят от теплофизических характеристик грунта, величина критического времени нагрева  $t_0$  в каждом конкретном грунте вероятно будет своя.

2) Формула справедлива при условии, что в процессе нагрева теплопроводность грунта не меняется. То есть для мерзлого грунта, во-первых, нагрев не должен сопровождаться фазовыми переходами «лед – вода» (теплопроводность воды и льда существенно отличаются), во-вторых, при испытаниях теплопроводность грунта не должна зависеть от его температуры.

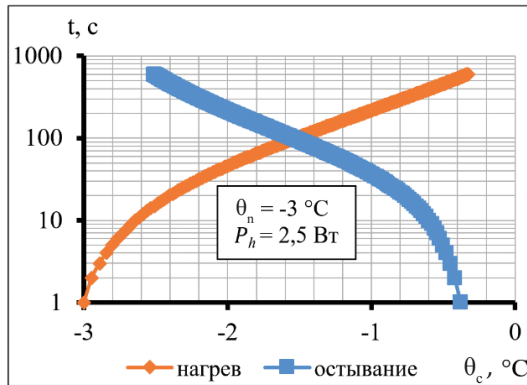
3) Тепловой коэффициент зонда  $A$  прямо пропорционален мощности нагрева, зависит от размеров конуса, инвариантен по отношению к коэффициенту теплопроводности грунта  $\lambda_s$ .

4) Параметры зонда и условия испытаний при реальном термостатическом зондировании могут не полностью соответствовать принятым расчетным предпосылкам: отсутствие теплообмена между нагреваемым конусом и вышележащей частью зонда (муфтой трения, тензоэлементами и др.); отсутствие анизотропии теплофизических свойств грунта; конус нагревается равномерно, плотность генерируемого на всей его боковой поверхности тепла равна. В связи с этим возможны отклонения и погрешности при применении формулы (10) для определения коэффициента теплопроводности грунта.

С целью проверки полученного решения теплофизического взаимодействия конусно-зонда постоянной мощности нагрева с мерзлым (без оттаивания) грунтом для оценки

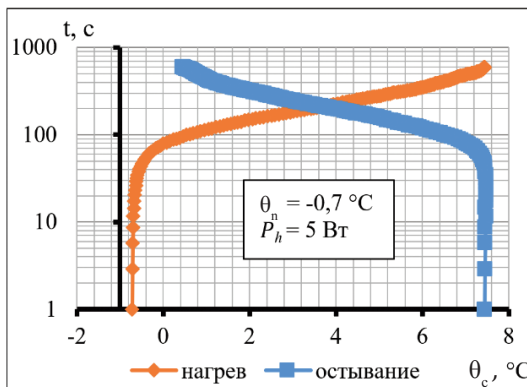
его коэффициента теплопроводности были проведены численные и лотковые (в холодильной камере, использовался зонд стандартных размеров) теплофизические исследования. Примеры изменения температуры конуса при численном моделировании и лотковых экспериментах системы «НТ-СРТ зонд – мерзлый грунт» представлены на рисунках 3, 4.

Результаты экспериментов подтвердили корректность и возможность применения разработанной аналитической модели для определения коэффициента теплопроводности мерзлого грунта при термостатическом зондировании НТ-СРТ зондом.



**Рис. 3.** Численное моделирование нагрева и остывания конуса НТ-СРТ зонда в мерзлом суглинке при начальной температуре грунта  $\theta_n = -3^\circ\text{C}$  ( $W_{tot} = 0,225$  д.е;  $P_h = 2,5$  Вт)

**Fig. 3.** Numerical simulation of heating and cooling of the HT-CPT probe cone in frozen clay at the initial ground temperature  $\theta_n = -3^\circ\text{C}$  ( $W_{tot} = 0,225$  д.е;  $P_h = 2,5$  Вт)



**Рис. 4.** Лотковые испытания нагрева и остывания конуса НТ-СРТ зонда в мерзлом песке при начальной температуре грунта  $\theta_n = -0,7^\circ\text{C}$  ( $W_{tot} = 0,048$  д.е.;  $P_h = 5$  Вт)

**Fig. 4.** Tray tests of heating and cooling of the HT-CPT probe cone in frozen sand at the initial ground temperature  $\theta_n = -0,7^\circ\text{C}$  ( $W_{tot} = 0,048$  д.е.;  $P_h = 5$  Вт)

## Выводы

На основе анализа теплофизического взаимодействия генерирующего тепловой поток малой мощности конусного зонда с талым и мерзлым (без оттаивания) грунтом получено аналитическое решение, позволяющее оценить коэффициент теплопроводности грунта по термограмме нагрева конуса и тепловому коэффициенту зонда  $A$  (зависит от параметров зонда, должен определяться в результате тарировки).

Результаты численных и лотковых экспериментов подтвердили корректность и возможность применения разработанной аналитической модели для определения коэффициента теплопроводности мерзлого грунта при термостатическом зондировании НТ-СРТ зондом.

## Список литературы

1. Andersland O.B. Frozen Ground Engineering / O.B. Andersland & B. Ladanyi. ASCE. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2004. 363 p.
2. Blackwel J.H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk. *Journal of Applied Physics*, 1954, vol. 25, no. 2, pp. 137–144.
3. Ершов Э.Д. Методы геокриологических исследований. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.
4. Ершов Э.Д. Теплофизические свойства горных пород / Э.Д. Ершов, В. И. Артюшина, Е. Н. Барковская и др. Москва: Изд-во МГУ, 1984. 204 с.
5. Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М.: Научный мир, 2003. 608 с.
6. Мотенко Р.Г. Определение теплофизических свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих нефтезагрязненных заторфованных грунтов с помощью различных методов / Р. Г. Мотенко, Д. В. Власенко, Ю. С. Калoshiна // *Инженерная геология*. 2023. Том XVIII. № 4. С. 64–78, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-4-64-78>.
7. Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. Москва: Наука, 1970. 208 с.
8. Хрусталеv Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. М.: Изд-во МГУ, 2005. 542 с.
9. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
10. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. Москва: Физматгиз, 1962. 456 с.

## References

1. Andersland O.B. Frozen Ground Engineering / O.B. Andersland & B. Ladanyi. ASCE. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2004. 363 p.
2. Blackwel J.H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk. *Journal of Applied Physics*, 1954, vol. 25, no. 2, pp. 137–144.
3. Ershov E.D. Metody geokriologicheskikh issledovaniy. M.: Izd-vo MGU, 2004. 512 p.
4. Ershov E.D. Teplofizicheskie svoystva gornyh porod / E.D. Ershov, V. I. Artyushina, E. N. Barkovskaya i dr. Moskva: Izd-vo MGU, 1984. 204 p.
5. Komarov I.A. Termodinamika i teplomassoobmen v dispersnyh merzlyh porodah. M.: Nauchnyj mir, 2003. 608 p.
6. Motenko R. G. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv merzlykh, promerzayushchih i ottai-vayushchih neftezagryaznennykh zatorfovannykh gruntov s pomoshch'yu razlichnykh metodov / R. G. Motenko, D. V. Vlasenko, Yu. S. Kaloshina. *Inzhenernaya geologiya*, 2023, vol. XVIII, no. 4, pp. 64–78, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-4-64-78>.
7. Porhaev G.V. Teplovoe vzaimodejstvie zdaniy i sooruzhenij s vechnomerzlymi gruntami. Moskva: Nauka, 1970. 208 p.
8. Hrustalev L.N. Osnovy geotekhniki v kriolitozone. M.: Izd-vo MGU, 2005. 542 p.
9. Cytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov. M.: Vysshaya shkola, 1973. 448 p.
10. Chudnovskij A.F. Teplofizicheskie harakteristiki dispersnykh materialov. Moskva: Fizmatgiz, 1962. 456 p.

## Сведения об авторе / Information about the author

**Исаев Олег Николаевич**, кандидат технических наук, сектор ГЛПС лаборатории № 35 «Освоение подземного пространства городов», НИИОСП им. Н.М. Герсееvа АО «НИЦ «Строительство». Москва.  
**Oleg N. Isaev**, Cand. Sci. (Engineering), Head of Geotechnics of linear underground structures Sector of Laboratory No. 35, NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow.