

Определение коэффициента теплопроводности больших массивов неоднородных сред

Determination of the thermal conductivity of large volumes of heterogeneous media

I.A. Zholobov, V.S. Zaitsev
(Giprotyumenneftegaz JSC, HMS Group, RF, Tyumen)

E-mail: ZholobovIA@gtng.ru

Keywords: permafrost soil, thermal conductivity, laboratory measurements, thermal characteristic

The basic initial data for thermal engineering calculations that provide reliable and safe operation of buildings and structures on permafrost soils are the thermophysical properties of soils, in particular the coefficient of thermal conductivity and heat capacity of soils in frozen and thawed states, determining the speed of advancement, the shape of the thawing haloes, etc., some of which poorly defined indirectly and require direct measurements. Carrying out of measurements in laboratory conditions requires transportation of soil samples from the sampling site with the preservation of not only the frozen state, but what is extremely important is the thermo stating at the level of the temperature values of the sample locations in order to obtain the most objective parameters of the soil properties. Although in most cases it is insignificant, but the coefficient of thermal conductivity of frozen soil depends on temperature, which can be explained in part by the presence of some unfrozen water. In the light of the above difficulties, according to the author, first of all, it is necessary to develop methods of field determination of thermophysical characteristics of frozen soils, as well as in connection with the need to determine the properties of large soil masses. These methods, in the opinion of the authors, have great prospects in connection with a reduction in transportation costs for samples and a more correct determination of soil properties in some cases, as well as the possibility of maintaining an undisturbed soil structure.

В ближайшие годы ожидается существенное увеличение темпов и объемов строительства инженерных объектов, в том числе гидротехнических, в Арктическом регионе. Для их строительства используются смеси крупно- и мелкообломочных пород (валуны, галька, гравий, песок). Характерные размеры частиц песка составляют 0,14–5 мм, гравия – 5–70 мм, валунов – более 70 мм. При проектировании инженерных объектов в районах Крайнего Севера необходимо проводить теплотехнические расчеты на основе данных о теплофизических свойствах грунтов усредненных по размерам строящихся объектов. Сложность решения этой проблемы заключается в том, что представительный образец такого грунта должен иметь размеры, на порядок большие характерных размеров неоднородности грунта.

Предлагаемая методика определения теплопроводности больших массивов неоднородных сред заключается в размещении на поверхности грунта, необязательно правильной геометрической формы, гибкого линейного

И.А. Жолобов, К.Т.Н.,
В.С. Зайцев, К.Т.Н.
(ПАО «Гипротюменнефтегаз»,
Группа ГМС)

Адрес для связи: ZholobovIA@gtng.ru

Ключевые слова: многолетнемерзлый грунт, коэффициент теплопроводности, прямые измерения, теплофизические свойства

DOI: 10.24887/0028-2448-2017-5-48-50

теплового источника длиной, намного превышающей размер наибольших грунтовых включений [1, 2]. На первом этапе исследований применялась медная труба с поперечным сечением в виде полукруга. Сверху на ней устанавливалась теплоизоляция для предотвращения тепловых потерь в окружающий воздух. Через трубу прокачивалась жидкость с определенным расходом и начальной температурой выше температуры окружающей среды. Разность между начальной и конечной температурами теплоносителя определяет количество тепла, ушедшего в грунт и, следовательно, средний коэффициент теплопроводности. Плоской поверхностью труба размещалась на исследуемом образце, который был собран из материалов с известной теплопроводностью. Средняя эффективная теплопроводность данного массива определяется по формуле

$$\lambda = \frac{\lambda_1 l_1 + \lambda_2 l_2 + \dots + \lambda_n l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}, \quad (1)$$

где $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ – коэффициент теплопроводности соответствующего участка, Вт/(м·К); l_1, \dots, l_n – длина соответствующего участка, м.

Теплопроводность исследуемого массива рассчитывается из уравнения

$$\lambda = 1,13\pi l c G \cdot \ln \left(\ln \frac{t_H - t_{гр}}{t_H - \Delta t - t_{гр}} \right), \quad (2)$$

где l – длина трубопровода, м; c, G – соответственно теплоемкость и массовый расход теплоносителя; t_H –

температура в начале трубопровода, °С; $t_{тр}$ – начальная температура образца, °С; $\Delta t = t_n - t_k$; t_k – температура в конце трубопровода, °С;

Анализ результатов исследований позволил сделать вывод о надежности методики расчета. Недостатком является потребность в большом числе единиц оборудования и измерительных приборов. Необходимы оборудование для нагрева и термостатирования теплоносителя, насосы для его прокачки. При исследовании регистрируется большое число параметров: расход теплоносителя, температура на входе в трубопровод и выходе из него, в системе термостатирования. Все это приводит к большим временным и трудовым затратам. Погрешности большого числа регистрируемых данных значительно снижают точность конечного результата.

Для упрощения методики измерения и снижения числа регистрируемых параметров предлагается использовать линейный электрический нагреватель, теплоизолированный от окружающего воздуха вместе с небольшим прилегающим участком грунта. Для задания теплового потока в исследуемый массив через нагреватель пропускают электрический ток. После установления стационарного теплового режима измеряют падение напряжения на нагревателе, силу тока и рассчитывают теплопроводность исследуемого массива по формуле

$$\lambda = \frac{UI}{(t_2 - t_1)} \cdot \Phi + A, \quad (3)$$

где U – падение напряжения, В; I – сила тока, А; t_1, t_2 – соответственно начальная температура в зоне контакта нагревателя с массивом и температура после установления стационарного режима (определяются по градуировочной зависимости $t_n = f(R)$, $R = U/I$ – сопротивление); Φ, A – коэффициенты, учитывающие геометрические параметры нагревателя и установленной на него теплоизоляции, определяются в результате предварительной градуировки на материалах с известной теплопроводностью.

Для реализации метода на исследуемом массиве горных пород размещают линейный гибкий электрический нагреватель. Его размер выбирается исходя из возможности перекрытия наибольших неоднородных включений. Нагреватель теплоизолируют от окружающего воздуха вместе с небольшим прилегающим участком грунта.

Линейный электрический нагреватель изготавливается из металла, электрическое сопротивление которого зависит от температуры [3] и определяется по формуле

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20^\circ\text{C})], \quad (4)$$

где R_{20} – электрическое сопротивление нагревателя при температуре, равной 20 °С; α – температурный коэффициент сопротивления.

В этом случае нагреватель одновременно служит датчиком температуры, по электрическому сопротивлению которого определяется температура в зоне контакта нагревателя с грунтом. Температуру рассчитывают по зависимости $t = f(R)$ или по формуле, полученной в результате преобразования выражения (4)

$$t = 20 + \frac{R_t - R_{20}}{\alpha \cdot R_{20}}, \quad (5)$$

$$t_1 - t_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha \cdot R_{20}}, \quad (6)$$

где R_1, R_2 – электрическое сопротивление при температуре соответственно t_1 и t_2 .

Использование такого линейного электрического источника позволяет облегчить процесс измерения в полевых условиях, сведя его к измерению только двух параметров: напряжения U и силы тока I . Это позволяет сократить время измерений и повысить их точность.

Для проведения исследований с целью проверки надежности данного метода были изготовлены четыре линейных источника нагрева из медного провода. На гибкую основу наносилась бифилярная намотка двух медных проводников, один из которых использовался в качестве нагревателя, второй – термосопротивления для контроля температуры, рассчитанной по напряжению и силе тока. Размеры линейных источников составляли 130×10 мм. До экспериментов предварительно проводилась тарировка. На рис. 1 представлена тарировочная зависимость температуры линейного источника нагрева от электрического сопротивления.

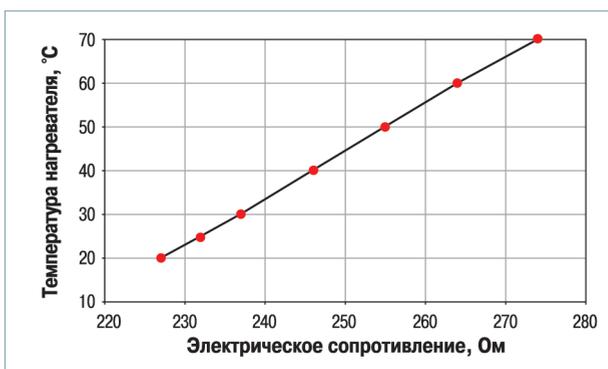


Рис. 1. Тарировочная зависимость температуры нагревателя от его электрического сопротивления

В качестве образцов использовались материалы с известной теплопроводностью λ : цементные камни (λ равнялось 0,85; 0,73 и 0,66 Вт/(м·К)); дерево ($\lambda = 0,12$ Вт/(м·К), пенопласт ($\lambda = 0,04$ Вт/(м·К)); кварцевое стекло ($\lambda = 1,34$ Вт/(м·К)). В зависимости от числа образцов эффективная теплопроводность массива, рассчитанная по формуле (1), изменялась от 0,04 до 0,73 Вт/(м·К). Во время исследований образцы нагревались при поддержании постоянного напряжения на нагревателе. После установления стационарного теплового режима определялись электрическое сопротивление термодатчика и характеристики нагревателя (U, I). Результаты приведены в табл. 1. По ним устанавливалось изменение температуры относительно начальной. На основе этих данных была получена зависимость электрического сопротивления нагревателя от эффективной теплопроводности (рис. 2).

Из табл. 1 следует, что значения электрических сопротивлений контрольного термодатчика и электронагревателя при установлении стационарного процесса тепло-

Таблица 1

λ , Вт/(м·К)	U , В	I , А	$P=U \cdot I$, Вт	$R_{изм}$, Ом	$R_{расч}$, Ом	$t_{изм}$, °С	$t_{расч}$, °С	t_1 , °С
0,04	34,60	0,127	4,39	275	272	71,84	69,03	22,34
0,06	34,60	0,127	4,41	274	271	70,74	67,85	22,2
0,10	34,60	0,130	4,52	269	268	65,24	63,80	21,9
0,29	34,60	0,133	4,60	263	260	58,64	55,51	22,3
0,36	34,60	0,133	4,60	262	260	57,54	55,51	22,15
0,40	34,60	0,135	4,68	261	257	56,44	52,08	22,2
0,56	34,60	0,137	4,74	253	253	47,64	47,15	22,3
0,73	34,60	0,139	4,81	251	249	45,44	43,15	22,2

Примечание. P – мощность нагревателя; $R_{изм}$, $R_{расч}$ – соответственно измеренное и рассчитанное электрическое сопротивление; $t_{изм}$, $t_{расч}$ – соответственно измеренная и рассчитанная температура.

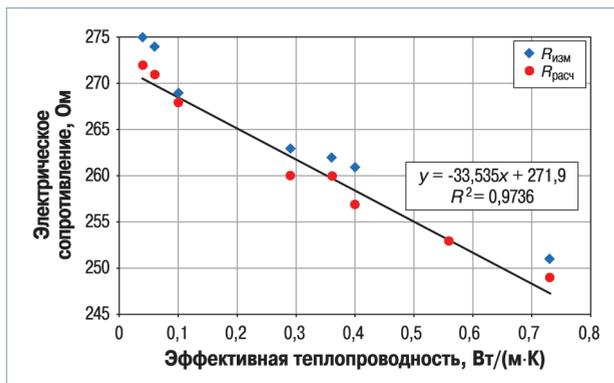


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления от эффективной теплопроводности

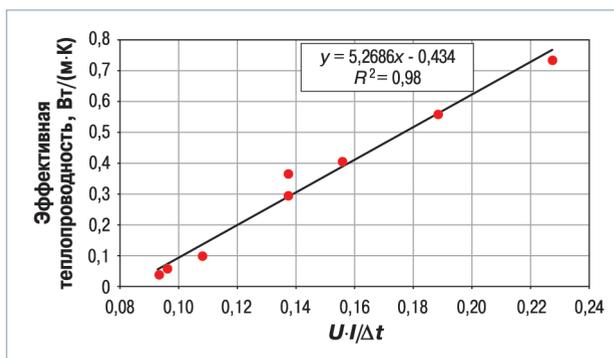


Рис. 3. Зависимость эффективной теплопроводности от $U \cdot I / \Delta t$

передачи совпадают. Для определения коэффициентов Φ и A была построена зависимость $\lambda = f(U \cdot I / \Delta t)$, приведенная на рис. 3. Эта зависимость линейная, $\Phi = 5,2686$, $A = -0,434$.

Для проверки данного метода были проведены измерения на образце с $\lambda_1 = 0,77$ Вт/(м·К) и на влажном песке с $\lambda_{п} = 1,16$ (Вт/м·К). Результаты измерений приведенные в табл. 2, были использованы определения теплопроводности по формуле (3). Полученные $\lambda_1 = 0,78$ Вт/(м·К), $\lambda_{п} = 1,25$ Вт/(м·К) находятся в пределах 10 % неопределенности измерения.

Таблица 2

λ , Вт/(м·К)	U , В	I , А	$P=U \cdot I$, Вт	$R_{расч}$, Ом	$t_{расч}$, °С	t_1 , °С
0,77	34,6	0,139	4,8094	248,92	43,15	22
1,16	34,6	0,151	5,2246	244,14	38,39	22

Для упрощения измерений строится зависимость $\lambda = f(U \cdot I / \Delta t)$, позволяющая определять теплопроводность по электрическим характеристикам U и I (рис. 4).

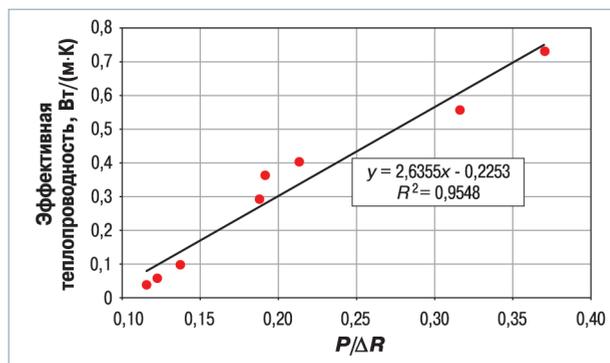


Рис. 4. Зависимость эффективной теплопроводности от $P / \Delta R$

На основе экспериментальных данных можно сделать вывод, что в теплофизических исследованиях при использовании электронагревателей, изготовленных из металла, термосопротивление которого зависит от температуры, изменение последней можно определять по электрическим параметрам нагревателя (U и I) без использования датчиков температуры. Это значительно упрощает исследования и дает возможность определять теплопроводность больших массивов в полевых условиях, так как измерение напряжения и силы тока не представляет большой сложности.

Список литературы

1. А.с. 1827607 СССР. МКИЗ G 01 N 25/18. Способ определения коэффициента теплопроводности больших массивов неоднородных сред//Ю.С. Даниэлян, В.С.Зайцев, Е.С. Ашпиз. – № 4920563/25; заявл. 21.03.91; опубли. 15.07.93.
2. Даниэлян Ю.С., Зайцев В.С. Определение коэффициента теплопроводности больших массивов грунтов//Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 5. – С. 98–100.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике. 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

References

1. Certificate of authorship no. 1827607 SSSR. MKI3 G 01 N 25/18, Spособ opredeleniya koeffitsienta teploprovodnosti bol'shikh massivov neodnorodnykh sred (Method for determining the thermal conductivity of large massif of inhomogeneous media), Authors: Danielyan Yu.S., Zaytsev V.S., Ashpiz E.S.
2. Danielyan Yu.S., Zaytsev V.S., Determination of heat conductivity of large soil massifs (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2009, no. 5, pp. 98–100.
3. Kikhling Kh., Spravochnik po fizike (Handbook of physics): translated from the German, Moscow: Mir, 1985, 520 p.