

## Измерение коэффициента теплопроводности многолетнемерзлых грунтов в интервале практически значимых температур

**С.С. Примаков**, к.т.н.

(ООО «ТюменНИИгипрогаз»),

**И.А. Жолобов**

(ОАО «Гипротюменнефтегаз»,  
Группа ГМС)

Адреса для связи: PrimakovSS@yandex.ru,

ZholobovIgor@yandex.ru,

gtng@gtng.ru

**Ключевые слова:** многолетнемерзлый грунт, коэффициент теплопроводности, прямые измерения, теплофизические свойства грунтов, прибор для определения теплопроводности.

В настоящее время актуальной является проблема освоения территорий Крайнего Севера, где сосредоточены значительные запасы углеводородного сырья. Сложные климатические, геологические и геокриологические условия на таких территориях требуют создания новых технологий возведения, безопасной эксплуатации зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. С целью прогнозирования и определения параметров работы сооружений, а также сохранения теплового режима многолетнемерзлых грунтов для обеспечения их устойчивости в течение всего периода эксплуатации выполняются расчеты теплотехнических показателей (ореолов оттаивания, осадок), выбор компенсирующих мероприятий и др.

Теплофизические свойства грунтов являются ключевыми, определяющими скорость продвижения и форму ореолов оттаивания. Одни свойства определяются косвенно (по нормативным документам, эмпирическим зависимостям и др.), другие – прямыми измерениями. Теплопроводность талого и многолетнемерзлого грунта является одним из основных параметров, сложно определяемых косвенным методом. На этот параметр влияет множество факторов: генезис, включения и структура льда, размеры и конфигурация частиц грунта и др. Поэтому фактическая теплопроводность может существенно отличаться от расчетной [1]. Требование прямого определения теплопроводности многолетнемерзлых грунтов стало неотъемлемой частью нормативной документации как в проектировании (СП 25.13330.2012), так и в инженерных изысканиях (СП 11-105-97, ч. IV).

### Measurement of the thermal conductivity of frozen soils in the range of practically significant temperature

S.S. Primakov (TyumenNIIGiprogaz, RF, Tyumen),

I.A. Zholobov (Giprotyumenneftegaz OAO, HMS Group, RF, Tyumen)

E-mail: PrimakovSS@yandex.ru, ZholobovIgor@yandex.ru,  
gtng@gtng.ru

**Key words:** permafrost soil, thermal conductivity, laboratory measurements, thermal characteristic of permafrost soil, developing of instrument for measure thermal conductivity.

Heat engineering calculations provide a reliable and safe operation of buildings and structures on permafrost soils. The initial data for the calculations are thermophysical properties of soils, determining the velocity of propagation, form halos thawing, etc., some of which, such as the thermal conductivity of the frozen soil poorly defined by indirectly method and require laboratory measurements. This measurement of the thermal conductivity of the frozen soil should be carried out in the actual temperature range for the given conditions of permafrost, which is associated with a number of technical problems due to the complex behavior of frozen soils at temperatures close to the beginning of freezing. In this article we propose a method and instrument for solving this task.

Особенность определения теплопроводности многолетнемерзлых грунтов связана в первую очередь со сложным поведением воды в грунте. В точке начала замерзания грунта, которая может существенно отличаться от нуля, замерзает не вся вода, часть ее остается в жидкой фазе при температуре ниже  $-70$  °C [2]. Следовательно, теплофизическое состояние грунта тесно связано с типом грунта, его структурой, составом воды, температурой и другими факторами. Поэтому порядок и правила измерения теплопроводности, регламентированные ГОСТ 26263-84 «Грунты. Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов», предписывают: «Теплопроводность грунтов определяют на образцах ненарушенного сложения с природной влажностью и льдистостью при естественных или расчетных температурах...». На практике основной проблемой является обеспечение «...естественных или расчетных температур...» измеряемого образца. Определение теплопроводности так или иначе связано с тепловым воздействием на исследуемый материал и, следовательно, изменением его температуры. Для большинства материалов теплопроводность слабо зависит от температуры, поэтому нагревом образца можно пренебречь. Исключения составляют многолетнемерзлые грунты, теплопроводность которых сильно зависит от температуры, и в диапазоне «...естественных или расчетных температур...», близких к нулю, может отличаться до 30 % и более.

Авторами предлагаются методика и устройство для измерения теплопроводности многолетнемерзлого грунта. В статье рассмотрены критерии применимости приборов для определения коэффициента теплопроводности различных строительных материалов, результаты

использования наиболее применимых приборов, выделены преимущества и недостатки.

Одним из ограничений использования приборов для работы с многолетнемерзлыми грунтами является недостаточный предел измерения теплопроводности, ориентированный либо на работу с теплоизолирующими материалами, теплопроводность которых значительно ниже теплопроводности грунтов, либо на работу со строительными материалами, диапазон теплопроводности которых не охватывает все возможные значения теплопроводности грунтов, изменяющиеся от 0,1 до 3 Вт/(м·К) и более.

Часть приборов, предназначенных для работы с жидкими, сыпучими или мягкими материалами, комплектуются игольчатыми щупами, поскольку тепловой контакт с датчиком обеспечивается измеряемой средой, обволакивающей щуп. Определение теплопроводности многолетнемерзлого грунта таким щупом без нарушения его структуры невозможно, так как сцементированность грунта вызывает необходимость высверливать отверстие под щуп, применять теплопроводящие пасты, заполняющие полученное отверстие, смазки для обеспечения теплового контакта и др. Такой подход может приводить к изменению теплофизического состояния грунта, а также к значительной погрешности измерения вследствие использования промежуточных паст или смазок, теплопроводность которых значительно отличается от теплопроводности грунта.

Кроме того, в настоящее время в большом числе приборов используется нестационарный метод определения теплопроводности, который подразумевает последовательные нагрев и охлаждение образца, а полученная скорость распространения в нем тепловой волны интерпретируется определенным значением теплопроводности. Данный метод позволяет сократить время измерения и применим для материалов, теплопроводность которых не изменяется в зависимости от температуры. Использование этого метода для определения теплопроводности многолетнемерзлых грунтов может приводить к некорректным значениям из-за широкого диапазона температур в образце, образующегося при измерении, а также из-за фазового перехода воды в грунте при чрезмерном тепловом воздействии прибора. Для снижения этих эффектов измерение нестационарным способом выполняется на переохлажденном грунте (от  $-10$  до  $-15$  °С), теплопроводность которого сильно отличается от температуры грунта в его естественном состоянии (от  $-0,7$  до  $-4$  °С). Следовательно, теплопроводность грунта определяется в том состоянии, в котором он не существует в природе, а значение может отличаться до 30 % и более от теплопроводности в естественных условиях.

Анализ приведенных факторов позволил выявить наиболее применимый для измерения теплопроводности серийный прибор и сравнить его работу с установкой по определению теплопроводности стационарным методом, а также с модернизированным авторским прибором. Отличительной особенностью последнего является возможность измерения теплопроводности многолетнемерзлого грунта в интервале температур, отражающем естественные условия залегания грунтов, что достигается за счет регулирования и контроля градиента

температур на исследуемом образце. На модернизируемый прибор получены авторское свидетельство [3] и свидетельство о прохождении аттестации в Сибирском государственном НИИ метрологии.

В ходе испытаний были проведены измерения теплопроводности мерзлого грунта при различных температурах на установках трех разных конструкций: серийным прибором; на лабораторной установке; авторским прибором. Работа серийного прибора основана на нестационарном методе по ГОСТ 30256-94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом». В качестве чувствительного элемента в приборе используется поверхностный плоский зонд, который размещается на ровной подготовленной поверхности образца. Коэффициент теплопроводности определяется по изменению температуры при нагреве тепловым источником и при остывании образца.

Лабораторная установка разработана на основе методики представленной в работе [3]. Она состоит из блока управления и измерительной ячейки. В измерительную ячейку помещается исследуемый образец. Блок управления отвечает за управление измерительной ячейкой и обработку поступающих показаний.

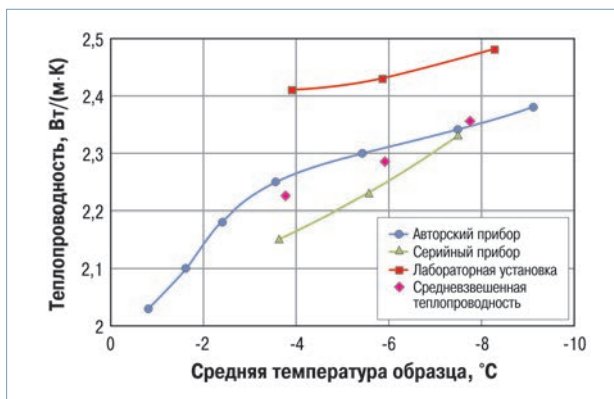
В авторском приборе используются стационарный метод, блок управления и измерительная ячейка, в которую помещаются исследуемый образец. Теплопроводность измеряется при небольших тепловых потоках и температурах, близких к нулю, при этом осуществляется постоянный контроль перепада температур.

Исследуемый образец грунта ненарушенной структуры представляет собой суглинок суммарной влажностью 0,3 и плотностью 1880 кг/м<sup>3</sup>. Результаты серии измерений на трех установках в одинаковых условиях в диапазоне температур от  $-10$  до 20 °С приведены в таблице и на рисунке. Измерения проводились в термостатирующей камере, образец вместе с измерительным элементом выдерживался достаточное время для установления термодинамического равновесия. Авторский прибор стабильно выдавал данные, в целом согласующиеся с работой [4] вплоть до границы температуры замерзания грунта, которая для данного образца была определена опытным путем и составила  $-0,5$  °С.

Все три установки показали в целом аналогичные результаты в температурном диапазоне до  $-4$  °С в термостатирующей камере. При температуре  $-4$  и  $-3$  °С значения теплопроводности, определенные серийным прибором, оказались явно заниженными, а при температуре  $-2$  и  $-1$  °С серийный прибор показал некорректные значения, что связано с интенсивным фазовым переходом в образце многолетнемерзлого грунта и, как следствие, неправильной интерпретацией распространяемой тепловой волны в образце. Температурный градиент в образце, возникающий при использовании стационарного метода при измерении на лабораторной установке, достигал в среднем 5 °С, что также не позволило провести измерения при температуре в термостатирующей камере выше  $-6$  °С.

Авторский прибор показал возможность определения теплопроводности во всем диапазоне температур вплоть до  $-0,6$  °С при температуре начала замерзания грунта

Температура в термостатирующей камере (на внешней стороне образца), °С	Авторский прибор		Лабораторная установка		Серийный прибор		
	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура на внутренней стороне образца в конце замера, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура на внутренней стороне образца в конце замера, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура поверхности образца до замера, °С	Температура поверхности образца в конце замера, °С
-1	2,03	-0,61	Образец интенсивно испытывает фазовый переход, измерение невозможно	Не измерялась	26418	-1,32	4,45
-2	2,10	-1,25			252,06	-2,35	1,66
-3	2,18	-1,78			1,38	-3,56	0,89
-4	2,25	-3,12			1,78	-4,51	0,04
-6	2,30	-4,87	2,15	-1,24	2,41	-6,97	-1,82
-8	2,34	-6,96	2,23	-3,15	2,43	-9,13	-3,73
-10	2,38	-8,21	2,33	-4,97	2,48	-11,81	-6,57
+22	1,68	25,11	1,72	27,94	1,58	22,24	28,24



Зависимость теплопроводности мерзлого грунта от температуры образца

-0,5 °С. Учитывая, что при этом характерная температура многолетнемерзлого грунта на глубине нулевых амплитуд на площадке отбора образца по данным инженерных изысканий составила -0,9 °С, можно сделать вывод о соответствии измеряемой теплопроводности ее значению в естественных природных условиях и в процессе реальной эксплуатации сооружений.

Определяемая теплопроводность является средней в образце, в котором на момент снятия показаний устанавливается определенный температурный градиент. Это справедливо для приборов, основанных на стационарном методе. При измерении нестационарным методом температура образца изменяется постоянно на протяжении всего измерения. При этом серийный прибор фактически не позволяет определить максимальную температуру образца при нагреве. Кроме того, затруднительно оценить температуру, при которой было получено значение теплопроводности. Тем не менее в первом приближении можно считать, что температура измерения для нестационарного метода является средней между температурой в начале и конце замера.

В качестве примера проведен расчет ореола оттаивания для трубопровода диаметром 530 мм с глубиной до верхней образующей 0,8 м и температурой продукта 35 °С. Данный пример показывает, что учет теплопроводности в практически значимом интервале температур качественно влияет на результаты теплотехнического расчета, при этом изменение теплопроводности на 5–6 % приводит к изменению ореолов оттаивания на 1,5–2 м в первые годы эксплуатации трубопровода.

## Выводы

1. Завышение теплопроводности многолетнемерзлого грунта при определении нестационарным способом, вероятно, связано с тем, что при значительном повышении температуры грунта (на 5 °С и более) в процессе измерения часть связанной воды в грунте претерпевает фазовый переход. При этом температура воды не изменяется, суммарное изменение температуры образца замедляется, что интерпретируется прибором как увеличение скорости распространения тепла и, следовательно, как повышенная теплопроводность.

2. Заниженная теплопроводность многолетнемерзлого грунта при определении стационарным способом на лабораторной установке, очевидно, является следствием достаточно большого (до 5 °С) градиента температур в образце на установившемся режиме, когда фазовых переходов связанной воды не происходит. При этом, если для данного градиента температур вычислить средневзвешенную теплопроводность, определенную по полученной на авторском приборе зависимости, то значения с высокой точностью совпадают со значениями, измеренными на лабораторной установке (см. рисунок).

3. Прибор, разработанный авторами, учитывает недостатки известных измерительных установок и позволяет измерять теплопроводность многолетнемерзлого грунта в температурном диапазоне вплоть до границы фазового перехода при температуре, близкой к нулю. Полученная зависимость может быть использована в теплотехнических расчетах, научных изысканиях и для решения других вопросов в области геокриологии.

## Список литературы

1. Примakov С.С., Жолобов И.А. О необходимости лабораторных измерений теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов // Нефтяное хозяйство. – 2013. – №2. – С. 82–84.
2. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). – М.: Вычислительная школа, 1973. – 280 с.
3. А.С. 989419. Устройство для измерения теплопроводности твердых материалов / Ю.С. Даниелян, В.С. Зайцев, Е.А. Кудрявцев. – № 3265683; заявл. 27.03.81; опубл. 15.01.83.
4. Вакулин А.А. Основы геокриологии. – Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2011. – 220 с.

## References

1. Primakov S.S., Zholobov I.A., On the need for laboratory measurements of thermal properties of permafrost soil (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2013, no. 2, pp. 82–84.
2. Tsytoovich N.A., Mekhanika gruntov (kratkij kurs) (Soil Mechanics (short course)), 2nd ed., Moscow: Vychislitel'naya shkola Publ., 1973, 280.
3. Certificate of authorship no. 989419, Ustroystvo dlya opredeleniya teploprovodnosti tverdykh materialov (Device for determining the thermal conductivity of solid materials), Authors: Danielyan Yu.S., Zaytsev V.S.; 1989.
4. Vakulin A.A., Osnovy geokriologii (Fundamentals of Geocryology), Tyumen': Publ. of Tyumen State University, 2011, 220 p.