

УДК 681.3.08

✉ : . Dmebdh\ доктор технических наук, профессор;

✉ <. KydljZ , аспирант;

D. : . Gbdblb , магистрант

Ижевский государственный технический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА

Целеп jamevlZlu eZhjZlhjquo bkiulZgbc bgnhjZpbhggh -bafjblevggh kbklfu ,
ijgZagZqgghc ey bafjgby liehijhghklb jmgLZ .

Ключевые слова: информационно-измерительная система, теплопроводность грунта, линейный нагреватель, термопреобразователь сопротивления

В настоящее время в различных областях промышленности широко применяются автоматизированные системы комплексного учета ресурсов с целью обеспечения оперативного контроля за рациональным их использованием [1]. В частности, в теплоэнергетике при учете теплоносителя и тепловой энергии одной из функций данных систем является определение нормативных и фактических тепловых потерь в тепломагистралях. В связи с этим актуально знание теплофизических характеристик материалов и сред контролируемых объектов. Имеющиеся справочные данные по теплофизическим характеристикам, особенно для грунтов, в большинстве случаев получены в лабораторных условиях, и использование этих значений для различных конкретных ситуаций приводит к большим погрешностям в расчете тепловых потерь. Таким образом, задача определения теплофизических характеристик, например, коэффициента теплопроводности грунта в реальных условиях, является актуальной, следовательно, актуальны и разработки методов и технических средств измерения этого параметра.

На основе решения тепловой задачи для линейного источника теплоты в неограниченной среде [2] реализован динамический метод измерения теплопроводности грунта [3]. В соответствии с этим методом определение теплопроводности сводится к косвенным измерениям с использованием формулы

$$\lambda_{\text{изм}} = \frac{q_L}{4\pi m}, \quad (1)$$

где q_L – линейная плотность теплового потока источника; $m = \frac{\Delta T}{\ln(\tau_2) - \ln(\tau_1)}$ – коэффициент, определяемый экспериментально из уравнения линейной регрессии изменения температуры грунта ΔT от логарифма времени $\ln(\tau)$ в процессе его нагревания.

В качестве линейного нагревателя использован термопреобразователь сопротивления (ТПС) цилиндрической конструкции, который одновременно является датчиком температуры, что в целом упрощает конструкцию датчика теплопроводности, и одновременно упрощается схемотехника вторичной аппаратуры информационно-измерительной системы (ИИС).

Поскольку ИИС предназначена для проведения измерений в полевых условиях, то в целях экономии электроэнергии и обеспечения достаточно большой продолжительности работы необходимо ограничить мощность, затрачиваемую на нагревание грунта. В этом случае для обеспечения минимальной погрешности измерений требуется высокая разрешающая способность измерительного канала по температуре.

Структурная схема ИИС представлена на рис. 1 [4].

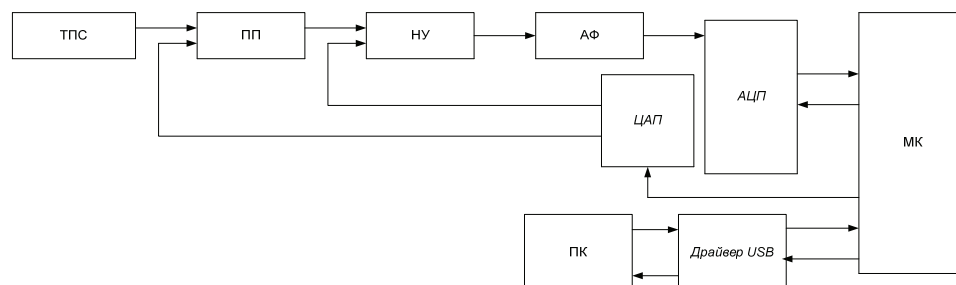


Рис. 1. Структурная схема ИИС для измерения теплопроводности грунта

В измерительный канал входят датчик теплопроводности – ТПС, промежуточный преобразователь (ПП), нормирующий усилитель (НУ) и аналоговый фильтр (АФ). Назначением ПП является преобразование сопротивления ТПС в эквивалентное ему напряжение, которое при помощи НУ усиливается до диапазона оцифровки аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Кроме усиления сигнала НУ обеспечивает аддитивную коррекцию выходной характеристики канала при отклонении начального сопротивления ТПС от номинального значения. Для управления измерительным током и напряжением смещения канала используются два цифроаналоговых преобразователя (ЦАП). Управление ЦАП осуществляется микроконтроллером (МК); связь МК с персональным компьютером (ПК) реализована по интерфейсу USB.

В процессе градуировки измерительного канала ИИС по предложенной ранее методике [5] были определены его параметры, представленные в таблице. Градуировка канала по теплопроводности на эталонных образцах не производилась, так как использованный метод измерения теплопроводности является абсолютным.

Параметры измерительного канала ИИС

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых температур, °C	–50...50
Диапазон измерительных токов, mA	1...50
Разрядность АЦП	18
Разрядность ЦАП	16
Разрешающая способность по сопротивлению, Ом при токе 50 mA	0,0002
Разрешающая способность по температуре, K при токе 50 mA	0,001

Конструкция датчика теплопроводности показана на рис. 2 и содержит распределенный вдоль оси чувствительный элемент из медного микропровода в виде ка-

тушки на медном каркасе с начальным сопротивлением 50 Ом, помещенный во фторопластовую и стальную защитные трубки.

Исследования ИИС производились в лабораторных условиях. Измерялся коэффициент теплопроводности λ в диапазоне 0,2...1,3 Вт/м·К песчаного и глиняного грунтов разной влажности, помещенных в цилиндрические емкости диаметром 0,17 и высотой 0,2 м. Емкости размещались на лабораторном столе и специально не термостатировались. Датчик теплопроводности устанавливался в грунт в центре емкостей, и многократно, в течение нескольких дней, производились замеры для набора статистических данных.

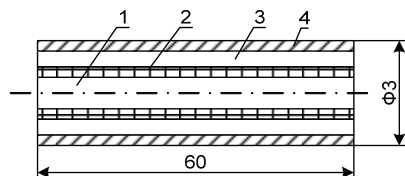


Рис. 2. Датчик теплопроводности: 1 – каркас; 2 – катушка нагревателя – чувствительного элемента; 3 – фторопластовая трубка; 4 – стальная трубка

В процессе измерений теплопроводности снималась зависимость температуры грунта от логарифма времени с момента начала нагрева (рис. 3).

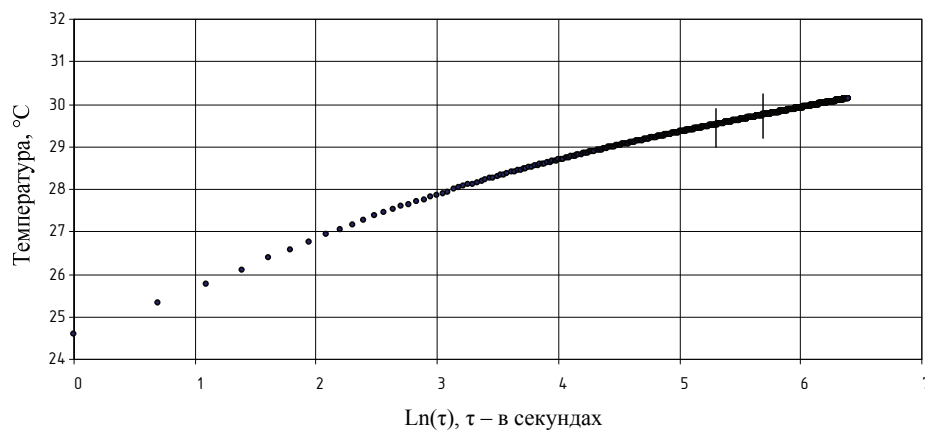


Рис. 3. Изменение температуры от логарифма времени для песка с теплопроводностью 0,337 Вт/м·К

Анализ зависимости для всех видов грунтов показал, что на интервале времени от 200 до 300 сек. после начала нагрева (выделен на рис. 3) изменение температуры от логарифма времени носит линейный характер и определяется только свойствами грунта. В соответствии с теорией метода [3] этот интервал использовался для определения коэффициента теплопроводности.

С целью определения рабочего измерительного тока датчика были проведены измерения теплопроводности песчаного грунта при различных значениях тока. По результатам экспериментов получена зависимость относительной погрешности

измерений, определяемой по формуле $\delta = \frac{S(\lambda)}{\bar{\lambda}}$, где $S(\lambda)$ – стандартное отклонение, а $\bar{\lambda}$ – среднее значение теплопроводности, от величины, обратной квадрату измерительного тока, которая показана на рис. 4. Как видно, зависимость имеет линейный характер и может быть представлена в виде

$$\delta = \frac{A}{I_0^2} + B, \quad (2)$$

где $A = 0,0027 \text{ мА}^2$ – коэффициент влияния измерительного тока; $B = 0,436$ – постоянная составляющая, определяемая всей совокупностью других влияющих на результат измерений факторов.

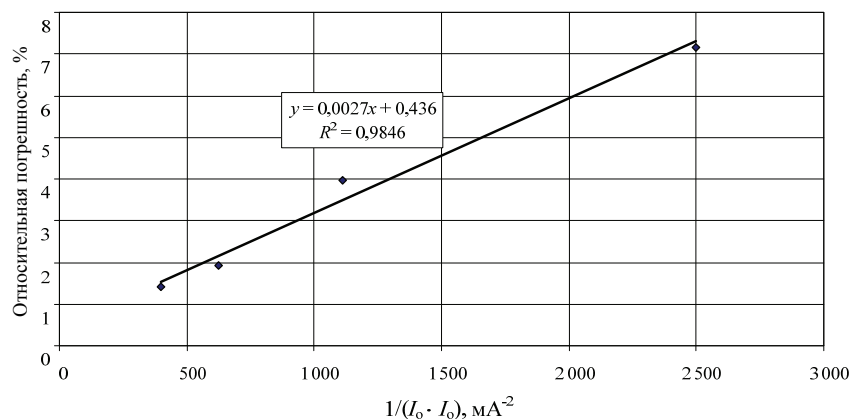


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности от измерительного тока

На основании полученных данных в качестве рабочего измерительного тока датчика теплопроводности был выбран ток 50 мА, который обеспечивает приемлемую погрешность измерений, не превышающую установленную ГОСТ 30256–94 [6] норму 7 %, при допустимом уровне энергопотребления не более 0,15 Вт.

Для определения верхней границы измеряемых значений коэффициента теплопроводности интерес представляет зависимость перегрева среды на рабочем временном интервале от теплопроводности. На рис. 5 перегрев показан графически в функции от удельного термического сопротивления среды $\rho_t = 1/\lambda$. Коэффициент в уравнении регрессии представляет собой линейную плотность теплового потока, генерируемого датчиком теплопроводности. Его значение $K = 0,0763 \text{ Вт/м}$ может быть использовано для теоретической оценки верхней границы диапазона измерений по формуле

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{K}{\Delta T_{\text{мин}}}, \quad (3)$$

где $\Delta T_{\text{мин}}$ – минимально допустимый перегрев среды на рабочем временном интервале, определяемый, например, разрешающей способностью канала измерения температуры. В нашем случае разрешающая способность канала составляет

$\Delta T_p = 0,001$ К. Задавшись допустимым уровнем погрешности измерений температуры, обусловленной разрешающей способностью, $\delta = \Delta T_p / \Delta T_{\min} = 0,04$, и используя выражение (3), находим $\lambda_{\max} = \frac{K\delta}{\Delta T_p} = 3,08$ Вт/мК.

На рис. 6 показана экспериментально найденная зависимость относительной погрешности измерения теплопроводности грунта от значения теплопроводности. Видно, что погрешность возрастает с теплопроводностью. Это может быть обусловлено следующими причинами. При увеличении теплопроводности снижается перегрев среды на рабочем временном интервале, что усиливает влияние колебаний температуры грунта, обусловленных колебаниями температуры среды на результат измерений. С увеличением теплопроводности также возрастает теплопроводность среды, увеличивается эффективный объем материала грунта вокруг датчика, вовлекаемого в измерения, и в связи с этим возрастает влияние краевых эффектов датчика теплопроводности, ограниченного по длине.

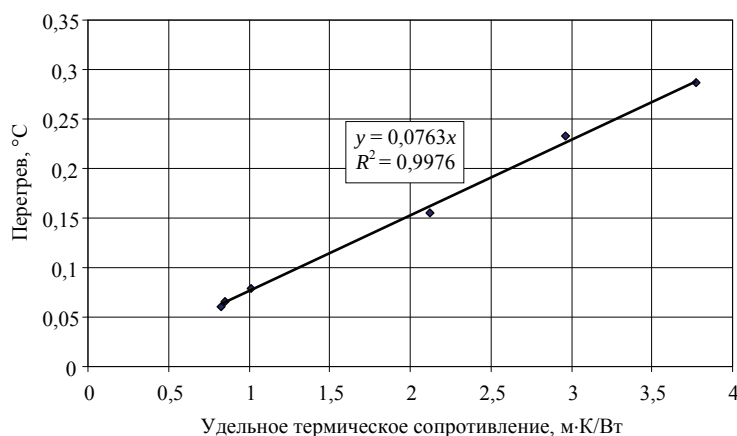


Рис. 5. Зависимость перегрева грунта на рабочем участке от удельного термического сопротивления

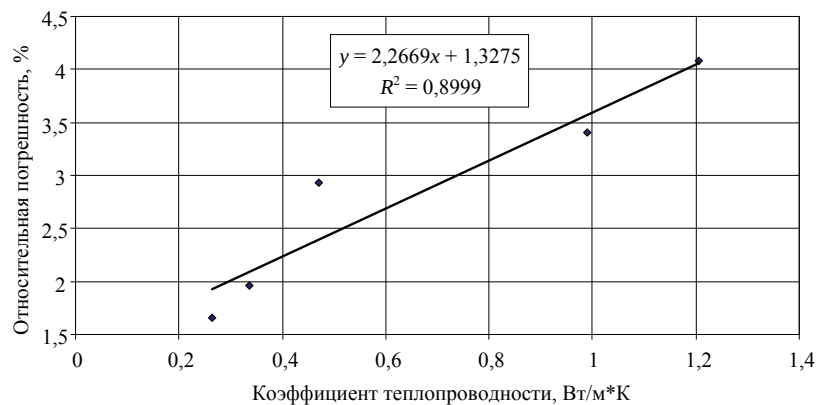


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности от коэффициента теплопроводности грунта

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность использования динамического метода и разработанной на его основе ИИС с датчиком теплопроводности указанной конструкции для измерения коэффициента теплопроводности грунта. Время одного измерения составляет 5 мин, при этом достигается погрешность измерений не более 7 %.

Полученные в экспериментах данные могут быть использованы для дальнейшей модификации конструкции датчика. Для снижения погрешности измерений целесообразно уменьшить диаметр датчика. При этом уменьшится объем грунта вокруг датчика, участвующего в измерениях, и уменьшится время измерений. Последнее позволит снизить влияние изменений температуры грунта в процессе измерений, обусловленных изменениями температуры среды.

Список литературы

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [принят Гос. Думой 11 нояб. 2009 г. : одобр. Советом Федерации 18 нояб. 2009 г.]. URL: <http://www.rg.ru/2009/11/27/energo-dok.html> (дата обращения: 27.04.2011).
2. *Ighbq* : . B., *lqbo* <. F. Расчеты теплового режима твердых тел. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1976. – 352 с.
3. *Dmebdh* \<. : ., *Kydlij* <. <. Динамические измерения теплопроводности грунта с применением линейного нагревателя – датчика температуры // Вестн. ИжГТУ. – 2011. – № 2. – С. 137–140.
4. *Dmebdh* \<. : ., *Gdbblbg* D. : ., *Kydlij* <. <. Информационно-измерительная система для исследования термопреобразователей сопротивления высокого разрешения // Электронные устройства и системы : межвуз. науч. сб. – Уфа : УГАТУ, 2010. – С. 56–60.
5. *Dmebdh* \<. : ., *Gdbblbg* D. : . Идентификация параметров измерительного канала термометра высокого разрешения // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. науч.-техн. конф. фак. «Информатика и вычислительная техника» ИжГТУ. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2010. – С. 188–191.
6. ГОСТ 30256–94. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом : стандарт. – Введ. с 01.01.96. – М. : Изд-во стандартов, 1996. – 16 с.

V. A. Kulikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University
V. V. Syaktereva, Postgraduate Student, Izhevsk State Technical University
K. A. Nikitin, Magstrand, Izhevsk State Technical University

Experimental Study of Information and Measuring System for Ground Heat Conductivity Measurement

Results of laboratory tests of the information and measuring system designed for ground heat conductivity measurement are presented.

Keywords: information and measuring system, ground heat conductivity, linear heater, resistance thermal converter

Получено: 13.04.11