

Таблица 1. Результаты одномерной оптимизации ветовой мишени

Количество выстрелов. Тип пули	Целевая функция CF	Оптимальное значение коэффициента K_{op}	Значение целевой функции CF		Отношение $\frac{CF_{k=0}}{CF_{k=K_{op}}}$
			$k = 0$	$k = K_{op}$	
100 «Альфа»	D_z	0,552	1,792	1,513	1,184
	$D_z^2 + D_y$	0,782	1,359	1,155	1,177
	$\sqrt{D_z^2 + D_y^2}$	0,603	2,249	1,912	1,176

Таблица 2. Результаты многомерной оптимизации световой мишени

Количество выстрелов. Тип пули	Целевая функция CF	Оптимальное значение коэффициента по каждому экрану				Значение целевой функции CF		Отношение $\frac{CF_{k=0}}{CF_{k=K_{op}}}$
		k_1	k_2	k_3	k_4	для всех экранов $k = 0$	оптимальное $k_i = K_{op}, i = 1...4$	
100 «Альфа»	D_z	0,555	0,553	0	0,692	1,792	1,510	1,187
	$D_z^2 + D_y$	0	0,843	0,766	0,783	1,359	1,149	1,182
	$\sqrt{D_z^2 + D_y^2}$	0,533	0,593	0,723	0,779	2,249	1,905	1,181

Список литературы

1. Коротаев В. Н., Аминов И. Р., Афанасьева Н. Ю. Уменьшение погрешности световой мишени из-за нутации полета тела / Вестник ИжГТУ. – 2007. – № 1. – С. 26–29.
 2. Афанасьев В. А., Коробейников В. В. Исследование возможностей уменьшения погрешностей световой мишени из-за нутации и прецессии тела // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2. – С. 103–109.
 3. Афанасьев В. А., Казаков В. С., Коробейников В. В. Экспериментальное исследование эффективности использования взвешенных времен в световой мишени // Интел-

лектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2. – С. 99–103.
 4. Пат. 2213320 Российская Федерация, МПК F41 J 5/02. Световая мишень / Н. Ю. Афанасьева, Ю. В. Веркиенко, В. В. Коробейников ; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УРО РАН. – № 2002116940/02 ; заявл. 24.06.02 ; опубл. 27.09.03. Бюл. № 27.
 5. Дьяконов В. П. Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 958 с.

I. V. Korobeynikova, Candidate of Technical Sciences, Izhevsk State Technical University
 V. V. Korobeynikov, Candidate of Technical Sciences, Institute of Applied Mechanics, Udmurt Center of UB RAS, Izhevsk
 S. V. Kazakov, Candidate of Technical Sciences, Institute of Applied Mechanics, Udmurt Center of UB RAS, Izhevsk

Optimization of Parameters of a Light Target

Optimization of parameters of a light target with the aim of increasing the accuracy of coordinates detection of impact points.

Key words: target, coordinates, nutation, precession, accuracy, optimization.

УДК 681.3.08

В. А. Куликов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет
В. В. Сяктерева, аспирант, Ижевский государственный технический университет

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ – ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Дано обоснование динамического метода измерения теплопроводности грунта на основе линейного нагревателя – датчика температуры. Приведены результаты электротеплового моделирования системы «датчик – среда» и результаты экспериментальной проверки метода.

Ключевые слова: теплопроводность грунта, моделирование, электротепловая аналогия, линейный нагреватель, датчик температуры.

Потребность в оперативном определении теплопроводности грунта возникает при оценке эффективности теплозащитных со-

оружий трубопроводов в теплоэнергетике и предъявляет особые требования к методу измерений. Такой метод должен давать воспроизводимый резуль-

тат без отбора проб грунта, быть простым в реализации, а время измерений не должно превышать нескольких минут.

Методы измерения теплопроводности делятся на две группы: статические и динамические [1]. Статические требуют выведения теплового процесса в исследуемой среде в стационарный режим, что затягивает процесс измерений. При этом вследствие длительности измерений требуется стабилизация внешних по отношению к образцу исследуемой среды условий, что удается достичь только в лаборатории.

Динамические методы дают возможность измерять теплопроводность, не доводя тепловой процесс в среде до стационарного режима. Это сокращает время измерений и уменьшает влияние изменений внешних условий на результат, что делает возможным проведение измерений без отбора проб в полевых условиях.

В работе рассматривается динамический метод измерения теплопроводности грунта, в основе которого лежит представление об объекте исследований как неограниченном теле с линейным источником теплоты. В этом случае процесс теплопередачи от источника определяется схемой, изображенной на рис. 1. Здесь среда представлена полуграниченным телом при краевых условиях: начальная температура $t|_{\tau=0} = t_0$; действует линейный источник тепла с плотностью потока $q|_{r=0, \tau \geq 0} = q_L$; на бесконечном удалении от источника температура равна начальной температуре: $t|_{r=\infty} = t_0$.

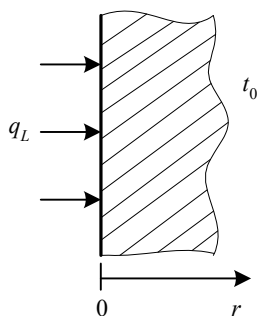


Рис. 1. Тепловая схема процесса теплопередачи

Решение данной тепловой задачи для обобщенного параметра температуры известно [2] и имеет вид

$$\Theta = -\frac{1}{4\pi} E_i \left(-\frac{1}{4F_0} \right), \quad (1)$$

где $E_i \left(-\frac{1}{4F_0} \right)$ – интегральная показательная функция; $F_0 \equiv \frac{a\tau}{r^2}$ – параметр Фурье; a – коэффициент температуропроводности тела; r – радиус – расстояние от нагревателя; τ – время.

Температура тела в этом случае определяется по формуле

$$t = t_0 + \Theta \frac{q_L}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – теплопроводность тела (среды).

Подставив выражение (1) в (2), получим:

$$t - t_0 = -\frac{q_L}{4\pi\lambda} E_i \left(-\frac{r^2}{4a\tau} \right). \quad (3)$$

Разложение интегральной показательной функции в ряд Тейлора [3] дает

$$-E_i \left(-\frac{r^2}{4a\tau} \right) = -C - \ln \left(\frac{r^2}{4a\tau} \right) + \frac{r^2}{4a\tau} - \left(\frac{r^2}{8a\tau} \right)^2 + \dots, \quad (4)$$

где $C = 0,577216\dots$ – постоянная Эйлера. Установлено, что ряд (4) имеет хорошую сходимость. Учет второго и третьего слагаемых, зависящих от времени, вносит изменения в результат на уровне десятой доли процента, поэтому влиянием слагаемых высших порядков, зависящих от времени, в выражении (4) можно пренебречь. Тогда, объединив (3) и (4), получаем:

$$t - t_0 \cong \frac{q_L}{4\pi\lambda} \left(-C - \ln \left(\frac{r^2}{4a\tau} \right) \right). \quad (5)$$

Раскрывая логарифм, формулу (5) можно привести к виду

$$t - t_0 \cong \frac{q_L}{4\pi\lambda} \left(\ln(\tau) - C - \ln \left(\frac{r^2}{4a} \right) \right). \quad (6)$$

Из последнего выражения видно, что $\Delta t = t - t_0$ и $\ln(\tau)$ линейно связаны коэффициентом $m = \frac{q_L}{4\pi\lambda}$, который может быть определен экспериментально из уравнения линейной регрессии Δt от $\ln(\tau)$. Таким образом, задача определения теплопроводности среды сводится к косвенным измерениям с использованием формулы

$$\lambda_{\text{изм}} \cong \frac{q_L}{4\pi m}. \quad (7)$$

Поскольку мы пренебрегли членами высшего порядка в уравнении (4), уравнение (5) является приближенным, и в определение теплопроводности по формуле (7) вносится методическая ошибка.

С целью исследования возможности применения данного метода для измерения теплопроводности грунта, а также проверки и уточнения расчетной формулы (7) были разработаны электротепловые модели системы «датчик – среда» [4] и проведены эксперименты в среде Мисго-Сар для пяти видов грунта с коэффициентами теплопроводности в диапазоне от 0,3 до 2,0 Вт/(м·К).

В качестве линейного нагревателя использован протяженный термпреобразователь сопротивления (ТПС) цилиндрической конструкции диаметром

1,5 мм с чувствительным элементом из медного микропровода в виде однослойной катушки на медном каркасе диаметром 0,5 мм и длиной 60 мм, который помещен в стальную трубку толщиной 0,15 мм (рис. 2). Нагреватель одновременно является датчиком температуры, что упрощает конструкцию датчика теплопроводности и одновременно упрощается схемотехника вторичной аппаратуры измерительной системы.

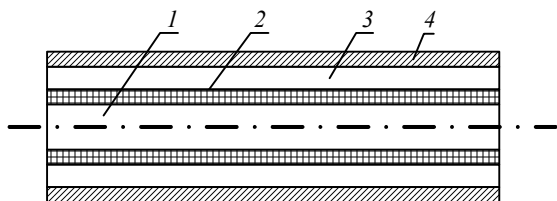


Рис. 2. Конструкция ТПС: 1 – каркас; 2 – катушка; 3 – воздушная прослойка; 4 – стальная трубка

В процессе моделирования были найдены зависимости температуры ТПС от времени. По этим зависимостям были построены графики изменения температуры от логарифма времени с момента включения нагревателя, один из которых представлен на рис. 3.

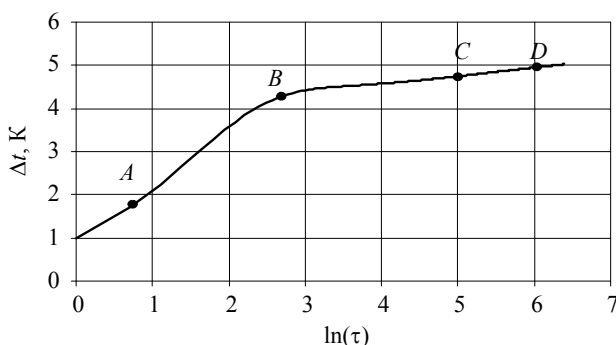


Рис. 3. График изменения температуры ТПС от логарифма времени для песка на модели

Анализ графиков для всех исследуемых грунтов показал наличие двух точек излома A и B.

На начальном участке после включения нагревателя до точки A закономерности изменения температуры ТПС обусловлены процессами распространения тепла в катушке нагревателя ТПС и каркасе. Этот интервал длится примерно 2 секунды. На интервале от точки A до точки B в тепловой процесс включаются воздушная прослойка и элементы конструкции, расположенные между чувствительным элементом ТПС и исследуемой средой (грунтом). Затем, начиная с точки B, теплофизические свойства грунта начинают полностью определять характер изменения температуры ТПС. На этом интервале имеется линейный участок зависимости Δt от $\ln(\tau)$, который может быть использован для измерения теплопроводности грунта. В качестве диагностического интервала выбран участок, отмеченный точками C и D, примерно от 200-й до 300-й секунды после включе-

ния нагревателя. Этот участок использовался для определения коэффициента m , далее по формуле (7) рассчитывалось значение теплопроводности $\lambda_{изм}$. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования динамических измерений теплопроводности грунта

Среда	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$\lambda_{изм}$, Вт/(м·К)	Погрешность измерений, %
Песок	1500	543	0,326	0,400	0,383	17,4
Глина каолиновая	1790	795	0,734	0,516	0,878	19,6
Глина	2000	837	0,930	0,556	1,122	20,6
Грунты суглинистые	1960	1156	1,490	0,658	1,842	23,6
Грунты песчаные тальные	2000	1247	2,000	0,802	2,573	28,6

Здесь ρ, c, λ, a – теплофизические параметры грунта – плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность, задаваемые в моделях.

Как видно из таблицы, существует систематическая погрешность измерений, которую можно учесть на этапе градуировки прибора. Эта погрешность коррелирует с λ и a (чем выше λ и a , тем больше погрешность) и, по-видимому, определяется краевыми эффектами на торцах линейного нагревателя – датчика температуры.

С целью повышения точности метода по результатам измерений был построен график зависимости значений теплопроводности λ , заложенных в моделях, от значений $\lambda_{изм}$, измеренных динамическим методом, представленный на рис. 4. Получена линейная зависимость $\lambda = 0,775\lambda_{изм} + 0,038$, которая позволила уточнить формулу для расчета теплопроводности при измерениях:

$$\lambda \cong 0,775 \frac{q_L}{4\pi m} + 0,038. \tag{8}$$

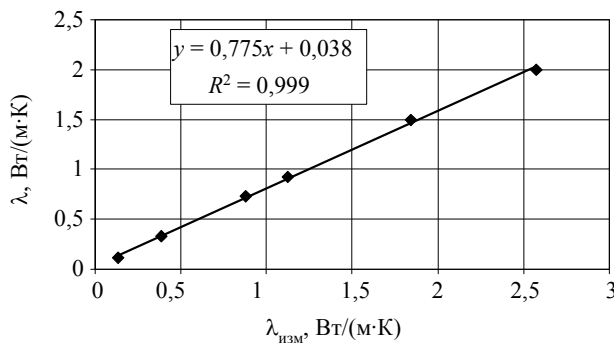


Рис. 4. График зависимости λ от $\lambda_{изм}$

По формуле (8) вновь была рассчитана теплопроводность грунта и получены новые значения по-

грешности измерений, не содержащие систематической составляющей (табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчета теплопроводности грунта

Среда	λ , Вт/(м·К)	$\lambda_{изм}$, Вт/(м·К)	Погрешность измерений, %
Песок	0,326	0,335	2,7
Глина каолиновая	0,734	0,718	-2,1
Глина	0,930	0,908	-2,4
Грунты суглинистые	1,490	1,466	-1,6
Грунты песчаные талые	2,000	2,032	1,6

Видно, что динамический метод измерения теплопроводности грунта с использованием формулы (8) на теоретической модели дает погрешность на уровне $\pm 3\%$, что подтверждает возможность и эффективность его применения.

Экспериментальная проверка метода проводилась в лабораторных условиях для песка с использованием лабораторной информационно-измерительной системы [5]. На рис. 5 представлен график изменения температуры ТПС от логарифма времени, на котором также можно отметить характерные точки излома *A* и *B*, совпадающие по времени с точками на теоретическом графике рис. 3. После точки *B* также присутствует линейный участок зависимости.

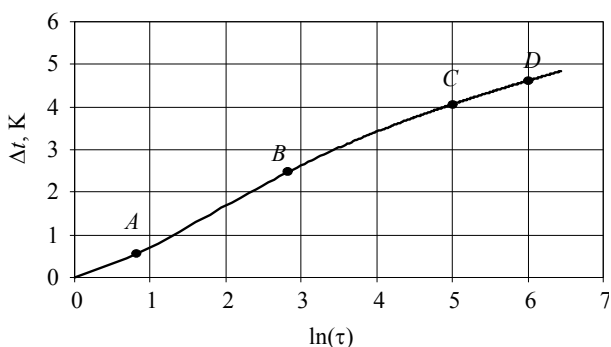


Рис. 5. График изменения температуры ТПС от логарифма времени для песка по эксперименту

Меньшее значение перегрева в точке *B* на экспериментальном графике свидетельствует, в частности, о меньшем реальном термическом сопротивлении пространства между чувствительным элементом и исследуемой средой, чем в электротепловой модели.

В целом экспериментальная зависимость подтверждает возможность применения динамического метода измерения теплопроводности грунта с применением совмещенного нагревателя – датчика температуры в виде ТПС представленной выше конструкции. Экспериментально для песка получено значение теплопроводности 0,338 Вт/(м·К), что достаточно хорошо совпадает с результатами моделирования.

Список литературы

1. Фокин В. М., Чернышов В. Н. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 212 с.
2. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., испр. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
4. Сяктерева В. В., Зылёв А. А., Куликов В. А. Электротепловое моделирование системы «датчик – среда» при измерении теплопроводности грунта // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 2. – С. 115–119.
5. Куликов В. А., Никитин К. А., Сяктерева В. В. Информационно-измерительная система для исследования термопреобразователей сопротивления высокого разрешения // Электронные устройства и системы: межвуз. науч. сб. – Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 56–60.

V. A. Kulikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

V. V. Syaktereva, Postgraduate Student, Izhevsk State Technical University

Dynamic Measurements of Ground Heat Conductivity with the Use of a Linear Heater – Temperature Sensor

A substantiation of a dynamic method of measuring ground heat conductivity on the base of a linear heater – temperature sensor is given. In this article is given a substantiation of a dynamic method of measuring ground heat conductivity on the base of a linear heater – temperature sensor. Results of electrothermal modeling the sensor-medium system and experimental check of the method are presented.

Key words: ground heat conductivity, modeling, electrothermal analogy, linear heater, temperature sensor.