

УДК 53.087.92

В. А. Куликов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
 К. А. Никитин, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ

Исследования теплофизики грунтов и тепловых процессов в них актуальны в различных сферах деятельности человека – от научных исследований в области изучения тепловых процессов, обусловленных рассеянием тепла ядра земли до решения практических задач, например, при строительстве зданий и сооружений в зонах вечной мерзлоты, прокладке трубопроводов, в сельском хозяйстве и пр.

Для измерения плотности теплового потока используются различные методы, из которых наиболее перспективным является градиентный метод, основанный на законе теплопроводности Фурье. Выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью датчики теплового потока и измерительные системы на их основе [1, 2] предназначены для измерений поверхностной плотности потока и не могут быть использованы для проведения измерений в объеме грунта, так как геометрическая форма датчиков не позволяет погружать их в грунт. Таким образом, актуальной является разработка метода первичного преобразователя (ППР) и системы, которые позволяли бы оперативно измерять плотность теплового потока, вводя первичный преобразователь в грунт.

Рассмотрим две тепловые схемы измерения плотности теплового потока в грунте (рис. 1).

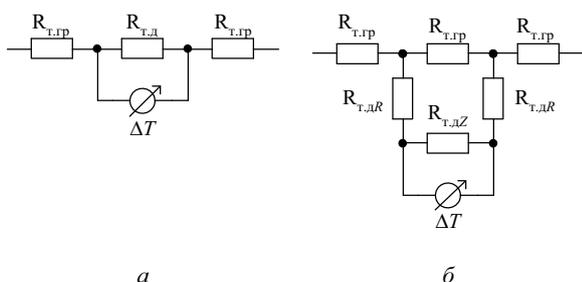


Рис. 1. Упрощенная тепловая схема измерения плотности теплового потока в грунте: $R_{т.гр}$ – термическое сопротивление грунта; $R_{т.д}$ – термическое сопротивление первичного преобразователя; $R_{т.лR}$, $R_{т.лZ}$ – термические сопротивления первичного преобразователя в радиальном и осевом направлениях соответственно

На рис. 1, а представлена тепловая схема, в которой в качестве измерительного слоя используется промежуточная среда ППР с известным коэффициентом теплопроводности. Измеряется разность ΔT температуры на боковых поверхностях среды с последующим расчетом плотности теплового потока по закону теплопроводности Фурье.

Одним из основных недостатков данной схемы является высокое термическое сопротивление $R_{т.д}$ ППР, превышающее термическое сопротивление грунта таких же размеров. В связи с этим ППР будет искажать температурные поля в грунте, что приведет к увеличению погрешности измерений.

Целесообразно для измерения плотности теплового потока в объеме грунта использовать ППР цилиндрической конструкции. Тепловая схема измерения в этом случае будет иметь вид, показанный на рис. 1, б, при этом в качестве промежуточного измерительного слоя используется сам грунт.

Предлагается следующий алгоритм измерения плотности потока:

1. Измеряется температура в двух точках грунта.
2. Измеряется коэффициент теплопроводности грунта.
3. По закону теплопроводности Фурье рассчитывается плотность теплового потока.

Как видно из тепловой схемы, ППР цилиндрической конструкции шунтирует грунт, следовательно, для обеспечения минимальной погрешности измерений необходимо обеспечить термическое сопротивление первичного преобразователя вдоль оси симметрии (направления протекания теплового потока) много больше термического сопротивления грунта.

На термических сопротивлениях $R_{т.лR}$ и $R_{т.лZ}$ образуется делитель температуры, в связи с чем ППР будет занижать измеренное значение градиента. Следовательно, необходимо также обеспечить минимальное термическое сопротивление первичного преобразователя в радиальном направлении.

Исходя из данных требований разработан ППР плотности теплового потока цилиндрической конструкции [3], состоящий из трех чувствительных элементов (ЧЭ), два из которых используются для измерения температуры в двух точках грунта, а третий, расположенный между ними, – для измерения коэффициента теплопроводности грунта с использованием нестационарного метода линейного источника тепла [4]. Одна из секции ППР представлена на рис. 2.

ЧЭ 3 выполнены из медного микропровода в виде однослойных, разнесенных по длине ППР катушек, непосредственно примыкающих к внутренней поверхности защитной трубки 1, что обеспечивает малую инерционность, малое в радиальном и большое в осевом термические сопротивления.

С использованием метода электротепловой аналогии [5] построены модели систем «датчик – среда» для грунтов с различными коэффициентами тепло-

проводности. По результатам моделирования получены градуировочные характеристики ППР:

$$\lambda = 0,781 \frac{P}{4\pi L \Delta T} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1} - 0,0496; \quad (1)$$

$$q = \lambda \frac{\Delta T_g}{l} + \theta \Delta T_g, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности грунта; P – мощность, выделяемая на третьем ЧЭ ППР длиной L ; ΔT – перепад температуры для моментов времени τ_1 и τ_2 , измеренный на линейном участке зависимости изменения температуры от логарифма времени; ΔT_g – разность температуры в двух точках грунта, разнесенных друг от друга на расстояние l ; $\theta = 0,4663 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – постоянная ППР теплового потока.

Точность измерений в значительной степени зависит от параметров канала измерения температуры, функциональная схема которого представлена на

рис. 3. Установлено, что на точность измерительного канала оказывают влияние напряжения смещения нуля всех активных элементов и разброс значений сопротивлений в пределах допуска [6], что приводит к систематической погрешности измерения на уровне 3,2 %, которая может быть скомпенсирована на этапе градуировки канала.

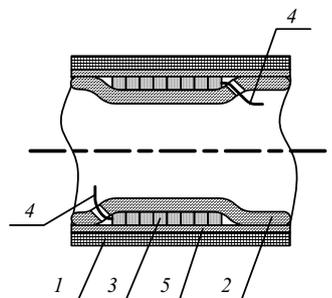


Рис. 2. Сечение первичного преобразователя плотности теплового потока: 1 – стальная защитная трубка; 2 – внутренний теплоизолирующий слой; 3 – катушка чувствительного элемента; 4 – соединительные провода; 5 – электроизолирующий слой

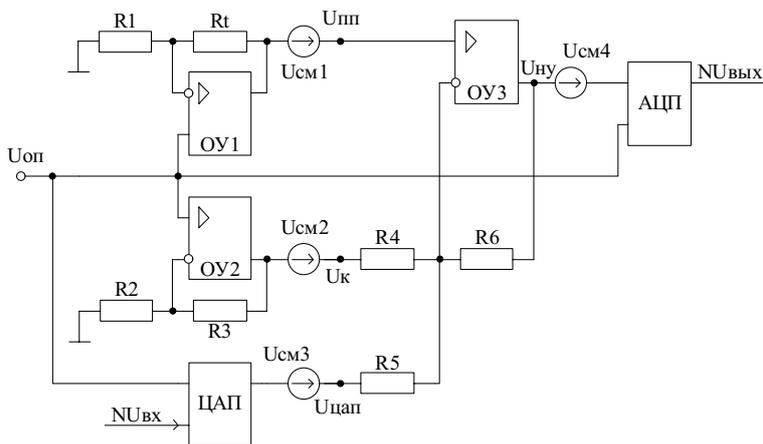


Рис. 3. Функциональная схема канала измерения температуры: $U_{см1}$ – напряжение смещения нуля ОУ1; $U_{см2}$ – напряжение смещения нуля ОУ2; $U_{см3}$ – напряжение смещения нуля ЦАП; $U_{см4}$ – напряжение смещения нуля ОУ3 и АЦП

По функциональной схеме измерительного канала (рис. 3) разработана его математическая модель и методика идентификации его параметров [7]:

$$NU_{\text{вых}} = \alpha R_t + \beta NU_{\text{вх}} + \gamma, \quad (3)$$

$$\alpha = \left. \frac{\Delta NU_{\text{вых}}}{\Delta R_t} \right|_{NU_{\text{вх}} = \text{const}}, \quad \beta = \left. \frac{\Delta NU_{\text{вых}}}{\Delta NU_{\text{вх}}} \right|_{R_t = \text{const}}, \quad (4)$$

$$\gamma = NU_{\text{вых}} - \alpha R_t - \beta NU_{\text{вх}},$$

где $NU_{\text{вых}}$ и $NU_{\text{вх}}$ – десятичный эквивалент выходного кода аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и входного кода цифроаналогового преобразователя (ЦАП) соответственно; R_t – сопротивления ЧЭ ППР.

Если α , β , γ известны, то значение R_t определяется по формуле

$$R_t = \frac{NU_{\text{вых}} - \beta NU_{\text{вх}} - \gamma}{\alpha}. \quad (5)$$

Выражения (4) используются при градуировке измерительного канала, а выражение (5) – в программном обеспечении системы для преобразования выходного кода АЦП в сопротивления ЧЭ и его температуру.

На точность измерения плотности теплового потока оказывают влияние условия окружающей среды. Для снижения этого влияния необходимо размещать ППР в объеме грунта на определенном расстоянии от его поверхности. С целью определения данного расстояния проведено моделирование процесса теплопереноса в грунте на основе метода электротепловой аналогии [8]. Получена зависимость линейного коэффициента ослабления влияния окружающей среды от коэффициента температуропроводности грунта (рис. 4).

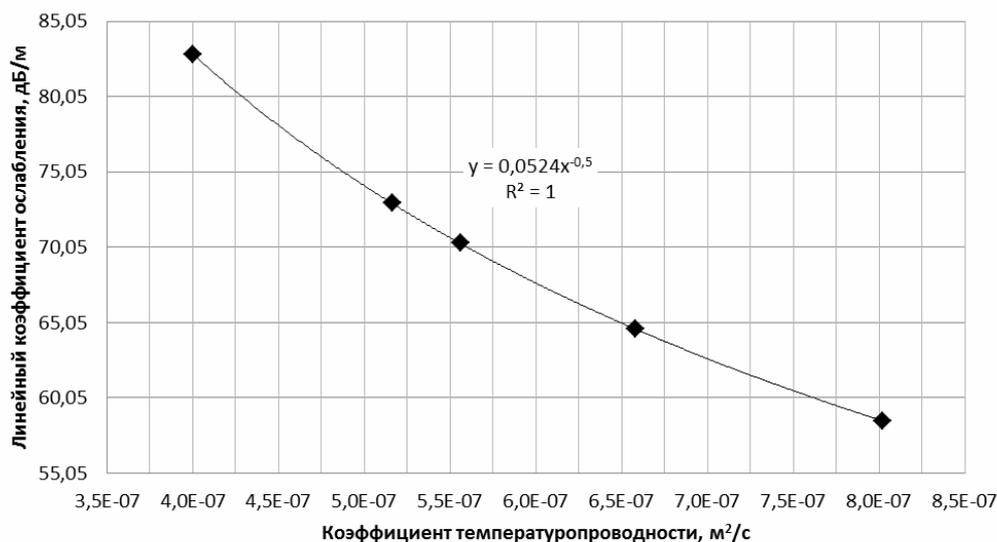


Рис. 4. Зависимость линейного коэффициента ослабления от температуропроводности грунта

Также по экспериментальным данным получена зависимость, позволяющая определить требуемую глубину погружения ППР Δl в зависимости от заданного значения коэффициента ослабления K и коэффициента температуропроводности грунта a :

$$\Delta l = 19,08K\sqrt{a}. \quad (6)$$

Для грунта с максимальными значениями коэффициентов тепло- и температуропроводности ($\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $a = 0,802 \text{ м}^2/\text{с}$) [9] минимально необходимая глубина погружения составляет 0,5 м.

Экспериментальные исследования ППР и системы проводились во второй половине апреля после схода снега. Измерялись значения тепловых потоков в объеме грунта и его поверхности на двух участках теплотрассы (см. табл.). На первом участке была нарушена теплоизоляция, второй участок имел теплоизоляцию на основе вспененных материалов. Измерительная аппаратура была установлена непосредственно в месте проведения измерений. Все измерения проводились в первой половине дня в солнечную погоду, температура окружающей среды составляла $+2 \text{ }^\circ\text{C}$, наблюдался сильный ветер. Средняя температура грунта $+19 \text{ }^\circ\text{C}$. Интервал между измерениями 10 мин.

Из таблицы видно, что поверхностная плотность теплового потока значительно отличается от плотности потока в объеме грунта и имеет отрицательный знак. Это свидетельствует о том, что тепловой поток направлен от поверхности грунта в направлении теплотрассы. Максимальная погрешность составляет минус 11 %.

Таким образом, подтверждается предположение, что тепловой поток, измеренный на поверхности грунта, в значительной степени зависит от изменений условий окружающей среды.

Измеренное значение плотности теплового потока в объеме грунта на втором участке теплотрассы примерно в три раза меньше, чем на первом.

Результаты измерения плотности теплового потока

№	$\Delta T_g, \text{ K}$			
	1-й участок		2-й участок	
	В объеме грунта	На поверхности	В объеме грунта	На поверхности
1	1,571	-0,253	0,470	-1,739
2	1,559	-0,258	0,472	-1,721
3	1,556	-0,264	0,473	-1,696
4	1,554	-0,273	0,474	-1,671
5	1,553	-0,280	0,471	-1,651
6	1,551	-	0,471	-
7	1,549	-	0,473	-
8	1,547	-	0,470	-
9	1,543	-	0,472	-
10	1,540	-	0,470	-
Сред.	1,552	-0,266	0,472	-1,696
СКО	0,009	0,011	0,001	0,04
Погр. %	1,3	-11	0,65	-5,4
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	1,357	0,782	1,64	0,95
$q, \text{ Вт}/\text{м}^2$	27,05	-2,72	9,90	-20,89

Таким образом, разработанная конструкция первичного преобразователя погружаемого типа и измерительная система на его основе пригодны для измерения плотности теплового потока в объеме грунта. В целом проведенные исследования подтверждают пригодность предложенной модификации градиентного метода для исследования тепловых процессов в грунте.

Библиографические ссылки

1. Датчик теплового потока ДТП 0924 / ОАО НПП «Эталон». – URL: http://www.omsketalon.ru/?action=dtp_0924&
2. ЭКСИС – контрольно-измерительные приборы. – URL: <http://www.eksis.ru/>
3. Пат. на изобретение № 2533755 (Россия), МПК G01K7/00. Термопреобразователь сопротивления (варианты) и способ его изготовления / В. А. Куликов, К. А. Никитин, М. А. Рогожников. – Заяв. 20.05.2013. № 2013122973 (Россия). – Опубл. 20.11.2014, бюл. № 32.

4. Blackwell J. H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk // J. Appl. Phys. – 1954. – Vol. 25. – Pp. 137–144.

5. Куликов А. В. Математическое моделирование тепловых процессов на виртуальных электрических моделях / ИжГТУ. – Ижевск, 2006. – Деп. в ВИНТИ 17.04.06, № 509-B2006. – 37 с.

Получено 30.09.2015

6. Куликов В. А., Никитин К. А. Канал измерения температуры высокого разрешения // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 1(57). – С. 100–103.

7. Пехович А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л. : Энергия, 1976. – 352 с.

УДК 621.3.08

Ю. Ф. Рубцов, кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Проблема ускорения развития и увеличения объемов производства и продажи продукции электротехнической промышленности в России в настоящее время является чрезвычайно актуальной. Актуальность проблемы ускорения развития и увеличения объемов производства продукции отечественной электротехнической промышленности заключается в разработке и внедрении новых технологий, в том числе в разработке и применении новых способов при испытаниях новых образцов продукции. Одним из таких новых способов, способствующих повышению качества продукции, является способ измерения параметров механических колебаний объектов.

Наиболее близким аналогом – прототипом предлагаемого способа измерения параметров механических колебаний контролируемых объектов – является способ определения амплитуды механических колебаний объекта [1].

В указанном способе измеряют параметры электрических колебаний в цепи с динамическим конденсатором, одной пластиной которого служит поверхность объекта, а другой – измерительный электрод. Измерительный электрод приводят в колебания с заданной амплитудой и с частотой, отличной от частоты колебаний объекта. Амплитуду механических колебаний объекта определяют по измеренным параметрам электрических колебаний с учетом заданной амплитуды колебаний измерительного электрода.

Формируют резонансный контур из динамического конденсатора и катушки индуктивности, возбуждают резонансные колебания электрического сигнала в контуре с частотой, превышающей частоты механических колебаний объекта и измерительного электрода.

Последовательно изменяют направление механических колебаний измерительного электрода в двух плоскостях. В каждом направлении механических колебаний измерительного электрода измеряют моментные значения частоты резонансных электрических колебаний в контуре, которые возводят в квад-

рат с помощью функции Фурье. Преобразования квадратов резонансной частоты электрических колебаний определяют модуль коэффициента Фурье, соответствующего частоте механических колебаний измерительного электрода.

Сначала направление механических колебаний измерительного электрода изменяют в произвольно выбранной плоскости, фиксируют направление механических колебаний измерительного электрода, в котором модуль коэффициента Фурье имеет максимальное значение, затем – в другой плоскости, перпендикулярной первой плоскости и проходящей через фиксированное направление механических колебаний измерительного электрода.

В дальнейшем опять фиксируют направление механических колебаний измерительного электрода, в котором модуль коэффициента Фурье, соответствующий частоте механических колебаний измерительного электрода, имеет максимальное значение. В последнем направлении механических колебаний измерительного электрода с помощью функции Фурье-преобразования квадратов резонансной частоты электрических колебаний определяют также и модуль коэффициента Фурье, соответствующего частоте механических колебаний объекта.

По отношению второго модуля коэффициента Фурье к первому с учетом заданной амплитуды колебаний измерительного электрода определяют амплитуду колебаний объекта.

Низкая точность способа определения амплитуды механических колебаний объекта-прототипа обусловливается отсутствием гальванической развязки между колебательным контуром и измерительной схемой. Вследствие этого на точность измерения влияют изменения емкости, индуктивности и электрического сопротивления внешних соединительных проводников, например, при изменении температуры внешней среды.

Недостатки:

1. В указанном способе необходимо изменять направление механических колебаний измерительного