

УДК 536.33

И.П. Курытник<sup>1</sup>, Б.Р. Нусупбеков<sup>2</sup>, Д.Ж. Карабекова<sup>2</sup>, А.К. Хасенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет Бельско-Бяла, Польша;

<sup>2</sup>Казахдинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан  
(E-mail: karabekova71@mail.ru)

### **Теоретические основы работы измерителей теплового потока для диагностики технологических процессов**

Актуальные задачи развития крупных технических систем, каковыми являются тепловые сети современных городов, связаны с необходимостью повышения эффективности их работы путем создания и внедрения новых методов и защиты. Разработка и создание приборов теплового потока позволят увеличить срок службы трубопроводов и снизить потери при доставке тепла потребителю. Разработана математическая модель для определения температуры и энергетических характеристик термоэлектрических преобразователей. В данном случае мы рассматриваем преобразование тепловой энергии в электрическую, так как данные преобразователи имеют большой спрос во многих отраслях науки и техники. Рассмотрение сложной модели многослойного чувствительного элемента прибора можно заменить рассмотрением более простой модели однородного чувствительного элемента соответствующей формы. Данное упрощение позволяет получить рабочие формулы для определения энергетических параметров излучения из рассмотрения температурного поля чувствительного элемента. В статье получены решения уравнения теплопроводности при различных параметрах нагрева и проведен анализ возникающей погрешности измерения энергетических параметров излучения, обусловленной неэквивалентностью тепловых потерь. Полученные данные легли в основу разработанных приборов для измерения энергетических параметров технологического процесса.

*Ключевые слова:* измеритель теплового потока, термоэлектрический преобразователь, диагностика, температурное поле, тепловые сети.

Тепловые методы неразрушающего контроля получили широкое распространение применительно к различного рода защитным покрытиям, для анализа состояния тепловой изоляции подземных трубопроводов, нефтегазовой промышленности, в строительстве и т.д.

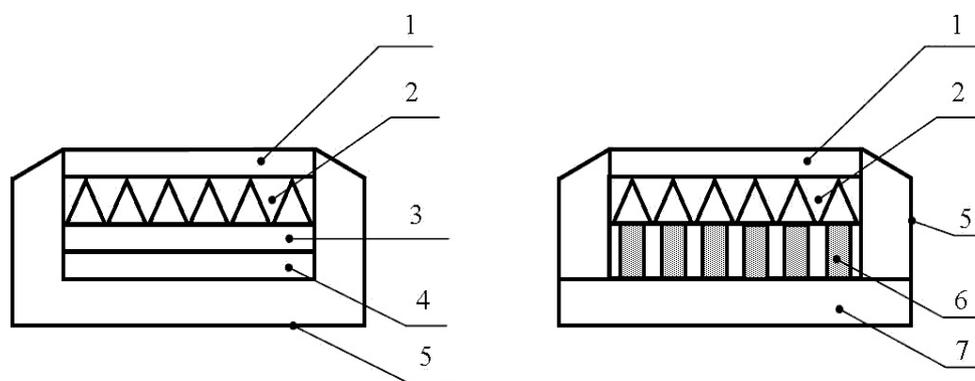
Нарушение тепловой изоляции приводит к изменению температуры на поверхности защитного покрытия. Вывод о состоянии тепловой изоляции можно сделать на основании данных о поверхностной температуре изоляции и температурном поле внутри исследуемого объекта [1].

Среди различных применений датчиков теплового потока особое место занимает контроль состояния тепловой изоляции трубопроводов с теплоносителями. Такой контроль может проводиться с помощью измерителей тепловых потерь, содержащих первичный термоэлектрический преобразователь теплового потока, теплоприемник и электронный блок преобразования измерения сигнала. Основным недостатком этих устройств является зависимость их показаний от случайных изменений параметров окружающей среды.

Для решения рассмотренных задач нами разработаны несколько модификаций датчиков теплового потока, показания которых не зависят от изменения состояния окружающей среды [2, 3]. Общим элементом этих приборов является батарейный термоэлектрический датчик специальной конструкции, выполняющий роль термоэлектрического преобразователя теплового потока. Термоэлектриче-

ский датчик выполнен в форме ограниченного цилиндра, одно основание которого представляет рабочую поверхность, второе основание имеет тепловой контакт с телом, имеющим температуру окружающей среды. Встроенные нагреватели позволяют создавать тепловой поток через термоэлектрический датчик в направлениях, перпендикулярных его основаниям [3].

В измерителе теплового потока «активные» спаи термоэлектрического преобразователя имеют тепловой контакт с приемной пластиной, а «пассивные» спаи — с нагревательным элементом, температура которого контролируется термозависимым элементом (рис.). Такая конструкция позволяет совместить функции двух термометрических блоков в одном. При подготовке прибора приемная пластина приводится в тепловой контакт с исследуемым объектом в области отсутствия дефектов тепловой изоляции. Через нагревательный элемент пропускается электрический ток такой величины, чтобы сигнал на выходе термоэлектрического преобразователя был постоянен. Это означает, что с помощью нагревательного элемента через термоэлектрический преобразователь теплового потока создается реперный тепловой поток, равный по величине и противоположный по направлению тепловому потоку от исследуемого объекта в области дефектов тепловой изоляции. При исследовании с возможными дефектами изоляции ток нагревательного элемента не регулируется. Это приводит к изменению сигнала на выходе термоэлектрического преобразователя теплового потока. По величине изменения этого сигнала можно судить о степени дефекта тепловой изоляции [4–7].



1 — приемная пластина; 2 — элемент; 3 — нагревательный элемент;  
4 — термозависимый; 5 — корпус прибора; 6 — термоэлектрический холодильник;  
термоэлектрический преобразователь теплового потока; 7 — радиатор

Рисунок. Схематическое изображение измерителя теплового потока

В качестве модели чувствительного элемента рассмотрим однородный ограниченный цилиндр.

Пусть функция  $q(t, r)$  описывает зависимость плотности теплового потока, обусловленного поглощенным излучением, падающим на одно из оснований цилиндра:

$$q(r, t) = \eta E(r, t), \quad (1)$$

где  $E(r, t)$  — облученность. Функция  $q_v(r, z, t)$  описывает зависимость мощности внутренних источников ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ) от радиуса  $r$ , высоты  $z$  и времени  $t$ . Со всей поверхности цилиндра происходит теплообмен по закону Ньютона со средой переменной температуры  $T_c(r, z, t)$ .

Уравнение теплопроводности и краевые условия в этом случае для цилиндра радиуса  $R$  и высоты  $\ell$  будут иметь вид

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} + \frac{q_v(r, z, t)}{\lambda} \right]; \quad (2)$$

$$T(r, z, 0) = f(r, z); \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(R, z, t)}{\partial r} = -\alpha_R [T(R, z, t) - T_c(R, z, t)]; \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = \alpha_0 [T(r, 0, t) - T_c(r, 0, t)]; \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, \ell, t)}{\partial z} = \alpha_\ell [T(r, \ell, t) - T_c^*(r, \ell, t)], \quad (6)$$

где  $T_c^*(r, \ell, t)$  — эквивалентная температура среды, равная

$$T_c^*(r, \ell, t) = T_c(r, \ell, t) + \frac{q(r, t)}{\alpha_\ell}, \quad (7)$$

$\alpha_R, \alpha_0, \alpha_\ell$  — коэффициенты теплообмена со средой для боковой поверхности и оснований цилиндра с  $z = 0$  и  $z = \ell$  соответственно.

Для решения краевой задачи (2)–(6) воспользуемся методом интегрального преобразования Ханкеля по переменной  $r$ :

$$\bar{T}(\mu_n, z, t) = \int_0^R r J\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) T(r, z, t) dr, \quad (8)$$

где  $J_0(\mu_n r / R)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $\mu_n$  — корни уравнения

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi_R}, \quad (9)$$

в котором  $Bi_R = \alpha_R R / \lambda$ .

Затем применим конечное интегральное преобразование общего вида по переменной  $z$ :

$$U(\mu_n, b_K, t) = \int_0^\ell \bar{T}(\mu_n, z, t) K(b_K, z) dz, \quad (10)$$

где  $K(b_K, z)$  — ядро преобразования. Положим

$$K(b_K, z) = \cos \frac{b_K}{\ell} z + \frac{Bi_0}{b_K} \sin \frac{b_K}{\ell} z, \quad (11)$$

где  $Bi_0 = \alpha_0 \ell / \lambda$ .

Нетрудно показать, что коэффициент  $b_K$  должен удовлетворять уравнению

$$ctg b_K = \frac{b_K^2 - Bi_0 Bi_\ell}{b_K (Bi_0 + Bi_\ell)}, \quad (12)$$

в котором  $Bi_\ell = \alpha_\ell \ell / \lambda$ .

Формулы обращения для конечных интегральных преобразований (8) и (10) имеют соответственно вид

$$\bar{T}(\mu_n, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(\mu_n, b_K, t) K(b_K, z)}{\int_0^\ell K^\alpha(b_K, z) dz}, \quad (13)$$

$$T(r, z, t) = \frac{\lambda}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{T}(\mu_n, z, t) \frac{\mu_n J_0(\mu_n r / R)}{(Bi_R^2 + \mu_n^2) J_0^2(\mu_n)}. \quad (14)$$

Совершая переход от изображения к оригиналу по формулам (13) и (14), получим искомое для выражения

$$\begin{aligned}
T(r, z, t) = & \frac{4}{\ell R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{K=1}^{\infty} C_R \frac{\mu_n J_0(\mu_n r / R) K(b_K, z)}{(Bi^2 + \mu_n^2) J_0^2(\mu_n)} \times \\
& \times \left\{ \exp \left[ -a \left( \frac{\mu_n^2}{R^2} + \frac{b_K^2}{\ell^2} \right) t \right] \int_0^{\ell} \int_0^R f(r, z) J_0 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) \times \right. \\
& \times K(b_K, z) dr dz + \frac{a}{\lambda_0} \int_0^t \exp \left[ -a \left( \frac{\mu_n^2}{R^2} + \frac{b_K^2}{\ell^2} \right) (t - \tau) \right] \times \\
& \times \left[ \alpha_{\ell}, K(b_K, \ell) \int_0^R \left( T_c(r, \ell, \tau) + \frac{q(r, \tau)}{\alpha_{\ell}} \right) dr + \right. \\
& + \alpha_0 K(b_K, 0) \int_0^R T_c(r, 0, \tau) r J_0 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) dr + \int_0^{\ell} (\alpha_R R J_0(\mu_n)) \times \\
& \left. \times T_c(R, z, \tau) + \int_0^R r J_1 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) q_v(r, z, \tau) dr \right] K(b_K, z) dz \left. \right\} d\tau,
\end{aligned} \tag{15}$$

где

$$\frac{1}{C_K} = 1 + \left( 1 - \frac{Bi_0^2}{b_K^2} \right) \frac{\sin^2 b_K}{2b_K} + (2 \sin^2 b_K + Bi_0) \frac{Bi_0}{b_K^2}. \tag{16}$$

Полученное решение (15) описывает распределение температуры в органическом сплошном цилиндре при крайних условиях (3)–(6).

Таким образом, предлагаемый подход позволил в данной работе рассмотреть температурное поле чувствительного элемента описанного прибора при различных случаях нагрева. Данный прибор может быть использован в блоке датчиков автоматизированной системы экспериментальных исследований конкретного процесса.

### Список литературы

- 1 Геращенко О.А., Грищенко Т.Г. Приборы для теплофизических измерений. — Киев: Час, 1991. — 73 с.
- 2 Антипов Ю.Н. Измерение импульсного излучения. — Караганда, 1981. — 94 с.
- 3 А.с. 27617 РК 1999 г. Прибор для измерения теплового потока. Антипов Ю.Н., Карабекова Д.Ж.
- 4 А.с. 37716 РК 2001 г. Прибор для измерения теплового потока. Кусаиынов К., Гладков В.Е., Карабекова Д.Ж.
- 5 Пат. № 1588 РК. Измеритель теплового потока / Нусупбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К., Нусупбеков У.Б., Аукеев О.Б.; опубл. 29.07.16, Бюл. № 4. — 4 с.
- 6 Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K. Thermal Methods and Non-Destructive Testing Instrumentation // Measurement Techniques. — 2016. — Vol. 59. — № 6. — P. 644–648.
- 7 Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K. Heat flow meter for the diagnostics of pipelines // Proceedings of SPIE Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. — Wilga, 2016. — P. 348–354.

И.П. Курытник, Б.Р. Нусупбеков, Д.Ж. Карабекова, А.К. Хасенов

## Технологиялық процестерді тексеру үшін жылу ағыны өлшегіштері жұмысының теориялық негіздері

Қазіргі кездегі қалалардың жылу желісі болып табылатын үлкен техникалық жүйелердің дамуының өзекті мәселелері жаңа әдістер мен қорғау құру және жүзеге асыру арқылы олардың қызметінің тиімділігін арттыру қажеттілігімен байланысты. Жылу ағыны құрылғыларын жобалау және құру құбырлардың қызмет мерзімін арттыруға және тұтынушыларға жылу жеткізу кезінде шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Термоэлектрлік түрлендіргіштің энергетикалық сипаттамасын және температураны анықтау үшін математикалық үлгі жасалды. Қарастырылып отырған түрлендіргіштер ғылым мен техниканың көптеген салаларында сұранысқа ие болғандықтан, жылу энергиясының электрлікке түрленуі қарастырылды. Аспаптың көпқабатты сезімтал элементінің күрделі моделіне сәйкес формадағы біртекті сезімтал элементтің қарапайым үлгісіне алмастыруға болады. Мұндай алмастыру сезімтал элементтің температуралық өрісінен сәулеленудің энергетикалық параметрлерді анықтау үшін қажетті жұмыстық формуланы алуға мүмкіндік береді. Мақалада қыздырудың әр түрлі жағдайларында сезімтал элементтің температуралық өрісін сипаттайтын жылуөткізгіштік теңдеуінің шешімі алынды. Ол мәліметтер технологиялық процестердің энергетикалық параметрлерін өлшеу үшін жобаланған аспаптарға негізделді.

*Кілт сөздер:* жылу ағынының өлшеуіші, термоэлектрлік түрлендіргіш, диагностикалау, температуралық өріс, жылу желілері.

I.P. Kurytnik, B.R. Nussupbekov, D.Zh. Karabekova, A.K. Khassenov

## Theoretical bases of work of heat flow meters for diagnostics of technological processes

The urgent tasks of developing large-scale technical systems, such as the heat networks of modern cities, are related to the need to improve the efficiency of their work by creating and implementing new methods and protection. The development and creation of heat flow devices will increase the service life of pipelines and reduce losses when delivering heat to the consumer. A mathematical model for determining the temperature and energy characteristics of thermoelectric converters is developed. In this case, we consider the conversion of thermal energy into electrical energy, since these converters are in great demand in many branches of science and technology. Consideration of a complex model of a multilayer instrument sensitive element can be replaced by considering a simpler model of a homogeneous sensitive element of the corresponding shape. This simplification makes it possible to obtain working formulas for determining the energy parameters of radiation from consideration of the temperature field of the sensitive element. In the paper, solutions are obtained for the heat conduction equation for various heating parameters and an analysis is made of the resulting error in measuring the energy parameters of radiation due to the nonequivalence of thermal losses. The obtained data formed the basis for the developed instruments for measuring the energy parameters of the technological process.

*Keywords:* heat flow meter, thermoelectric transducer, diagnostics, temperature field, heat networks.

### References

- 1 Gerashchenko O.A., Gryshchenko T.G. *Devices for thermal measurements*, Kiev: Chas, 1991, 73 p.
- 2 Antipov Yu.N. *Pulsed radiation measurement*, Karaganda, 1981, 94 p.
- 3 AS 27617 RK 1999. *A device for measuring heat flow*. Antipov Y.N., Karabekova D.Zh.
- 4 AS 37716 RK 2001. *A device for measuring heat flow*. Kusainov K. Gladkov V.E. Karabekova D.Zh.
- 5 Pat. Number 1588 RK. *Heat flow meter* / Nusupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Hasenov A.K., Nusupbekov U.B., Auke O.B.; publ. 07.29.16, Bull., 4, 4 p.
- 6 Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K. *Measurement Techniques*, 2016, 59, 6, p. 644–648.
- 7 Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K. *Proceedings of SPIE Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, Wilga, 2016, p. 348–354.