

## ТЕПЛОФИКАЦИЯ И ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

© 2021 г. Д. Ж. Карабекова<sup>а</sup>, \*, П. А. Кисабекова<sup>а</sup>, Б. Р. Нусупбеков<sup>а</sup>, А. К. Хасенов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Карагандинский университет им. Е.А. Букетова, Университетская ул., д. 28, г. Караганда, 100028 Казахстан

\*e-mail: karabekova71@mail.ru

Поступила в редакцию 29.11.2020 г.

После доработки 16.02.2021 г.

Принята к публикации 17.03.2021 г.

Многочисленные исследования показывают, что всем требованиям технической диагностики состояния тепловых сетей и технологических объектов в настоящее время удовлетворяют методы неразрушающего контроля, которые основаны на наблюдении и автоматизированной регистрации температуры процессов. Измерители теплового потока имеют ряд преимуществ по сравнению с другими устройствами, принцип действия которых базируется на методах неразрушающего контроля. Они отличаются высокой чувствительностью к изменению теплофизических характеристик контролируемых объектов, возможностью вести контроль без использования внешнего источника энергии, экономичностью, компактностью и простотой в эксплуатации. Разработаны несколько модификаций измерителей теплового потока (ИТП) на основе термоэлектрического батарейного элемента специальной конструкции. Отличительной особенностью конструкции ИТП является наличие термоэлектрического батарейного преобразователя, оснащенного термозависимым и нагревательным элементом, активные спаи которого совмещены с приемной пластиной, а пассивные спаи находятся в тепловом контакте с нагревательным элементом. Собрана экспериментальная модель подземной теплоизоляционной конструкции для исследований влияния температур теплоносителя и окружающей среды, глубины залегания трубопроводов, их технических параметров и параметров окружающей среды на характер распределения плотности теплового излучения с поверхности грунта над теплосетями. Выполнены экспериментальные работы по градуировке термопар, используемых для определения изменения температуры в грунте, вычислению коэффициента градуировки термопар и измерителя теплового потока. Приведены результаты исследования распределения и изменения температуры грунта. Разработанный прибор предназначен для анализа состояния тепловой изоляции подземных трубопроводов тепловых сетей.

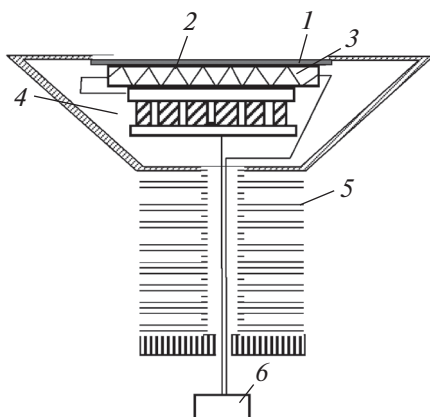
*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, термоэлектрический батарейный преобразователь, нагревательный элемент, приемная пластина, теплоноситель, тепловая сеть, термоЭДС, измеритель теплового потока

DOI: 10.1134/S0040363621100015

Энергосбережение является одним из приоритетов государственной политики Казахстана. В стратегии “Казахстан-2050” представлена программа социально-экономического развития республики, нацеленная на повышение энергетической безопасности. За последнее десятилетие в связи с ростом численности населения и стремительным развитием промышленности в стране расходование энергии возросло более чем в 2 раза. Дефицит энергии приводит к нарушению социально-экономической стабильности и ухудшению развития государства в целом. Основные энергетические проблемы, обусловленные экономическим ростом, чрезмерно и крайне неравномерным использованием энергетических ресурсов, энергетической нагрузкой инфраструктуры на окружающую среду, связаны с теплоэнергетикой. В теплоэнерге-

тике потребляется до 45% энергоресурсов, вырабатываемых в стране, и больше половины этих ресурсов приходится на коммунальные службы, являющиеся основополагающей составляющей развития экономики и главным фактором обеспечения нормальной жизнедеятельности граждан [1, 2].

Разработка и создание высокоточных измерителей теплового потока позволят повысить эффективность проведения теплотехнических измерений на промышленных объектах, проводить диагностику их состояния, своевременно обнаруживать технологические дефекты и оперативно определять причины их возникновения [3, 4]. Многочисленные исследования показывают, что всем требованиям технической диагностики состояния подземных трубопроводов тепловых сетей наиболее удовлетворяют методы неразруша-



**Рис. 1.** Схема измерителя теплового потока.  
1 – нагревательный элемент; 2 – термобатарея; 3 – термоэлектрический батарейный преобразователь теплового потока; 4 – термоэлектрический холодильник; 5 – радиатор; 6 – электронный блок

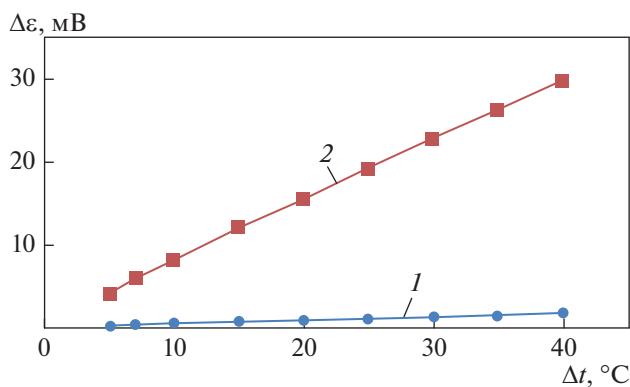
ющего контроля, которые основаны на наблюдении за температурным фоном теплопроводов [5].

В лаборатории “Измерение теплофизических величин” кафедры инженерной теплофизики им. профессора Ж.С. Акылбаева физико-технического факультета Карагандинского университета им. академика Е.А. Букетова разработан измеритель теплового потока, который работает по методу вспомогательной стенки (рис. 1) [6]. Теплотрический блок содержит термоэлектрический преобразователь теплового потока с батарейным термоэлектрическим датчиком. Термоэлектрический датчик выполнен в форме ограниченного цилиндра, одно основание которого служит рабочей поверхностью, второе основание имеет тепловой контакт с телом, контактирующим с окружающей средой. Встроенные на-

Градуировочная таблица

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Термопара		ИТП	
	$\Delta\epsilon_{\text{ст}}, \text{ мВ}$	$\alpha_{\text{ст}}, \text{ мВ/К}$	$\Delta\epsilon_{\text{ИТП}}, \text{ мВ}$	$\alpha_{\text{ИТП}}, \text{ мВ/К}$
5	0.195	0.039	4.0	0.80
7	0.273	0.039	5.9	0.842
10	0.391	0.039	8.1	0.81
15	0.549	0.037	12.0	0.80
20	0.790	0.039	15.4	0.77
25	0.951	0.038	19.2	0.768
30	1.196	0.039	22.8	0.76
35	1.362	0.0385	26.2	0.748
40	1.611	0.040	29.7	0.742

Примечание.  $\Delta t$  – приращение температуры;  $\alpha_{\text{ст}}, \alpha_{\text{ИТП}}$  – коэффициенты термоЭДС стандартный и измерителя теплового потока.



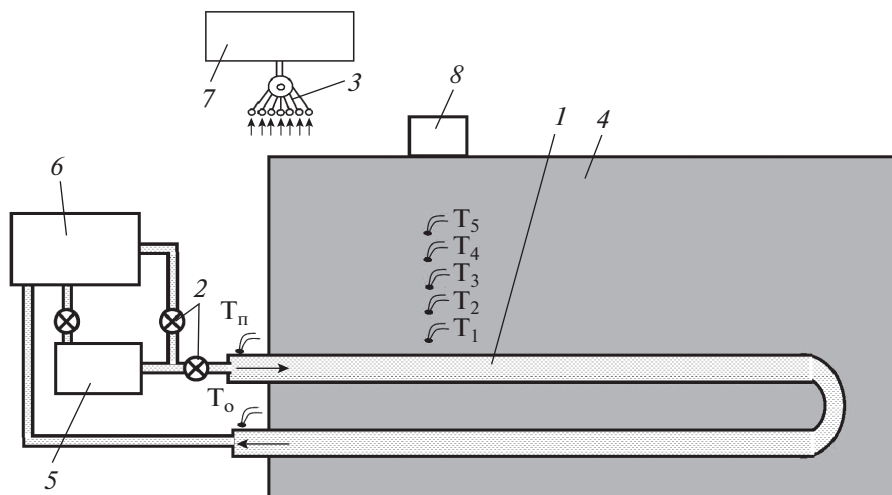
**Рис. 2.** Зависимость термоЭДС стандартной (1) и термоЭДС ИТП (2) от изменения температуры

греватели позволяют создавать тепловой поток через термоэлектрический датчик в направлениях, перпендикулярных его основаниям.

При оптимальной плотности потока теплового излучения 20–120 Вт/м<sup>2</sup> необходимая чувствительность теплочувствительного элемента обеспечивается при его высоте 1.0 мм и диаметре приемной площадки 50 мм. Значение коэффициента преобразователя должно быть равно 5.0–10.0 Вт/(м<sup>2</sup> · мВ), электрическое сопротивление преобразователя 15–18 кОм [7]. Градуировка ИТП была выполнена с помощью медь-константановой термопары относительно температуры 20°С. Данные градуировки приведены в таблице.

Значение термоЭДС ИТП  $\Delta\epsilon_{\text{ИТП}}$  превышает норму примерно в 20 раз по сравнению со стандартными градуировочными значениями термоЭДС  $\Delta\epsilon_{\text{ст}}$ . Это вызвано тем, что при чувствительности ИТП суммарное значение термоЭДС в контуре термобатареи больше, чем в отдельном термоэлектрическом преобразователе, т.е. увеличивается чувствительность датчика [8]. Значение коэффициента термоЭДС приблизительно одинаково для всех температур ( $\alpha_{\text{ср}} = 0.7824 \text{ мВ/К}$ ), что дает возможность определять температуру любого исследуемого вещества (рис. 2).

Влияние температур теплоносителя в теплосети и окружающей среды, глубины залегания трубопроводов и их технических параметров на распределение плотности теплового излучения с поверхности грунта над теплосетью изучали с помощью экспериментального стенда (рис. 3). При выполнении экспериментов исследовали температурное поле деревянного короба длиной 10.0 м и высотой 1.5 м, наполненного песком. Внутри короба был размещен U-образный трубопровод (теплообменник) длиной 20 м, наружным диаметром 32 мм и толщиной стенки 3.5 мм, в который поступал теплоноситель (вода). Общий вид лабораторной установки показан на рис. 4.



**Рис. 3.** Схема экспериментального стенда.

1 – U-образный трубопровод (имитатор подземной тепловой сети); 2 – регулятор давления; 3 – переключатель термомпар; 4 – грунт;  $T_1$ – $T_5$  – термомпары в грунте;  $T_n$ ,  $T_o$  – термомпары прямой и обратной воды; 5 – насос; 6 – термостат; 7 – компьютер; 8 – ИТП



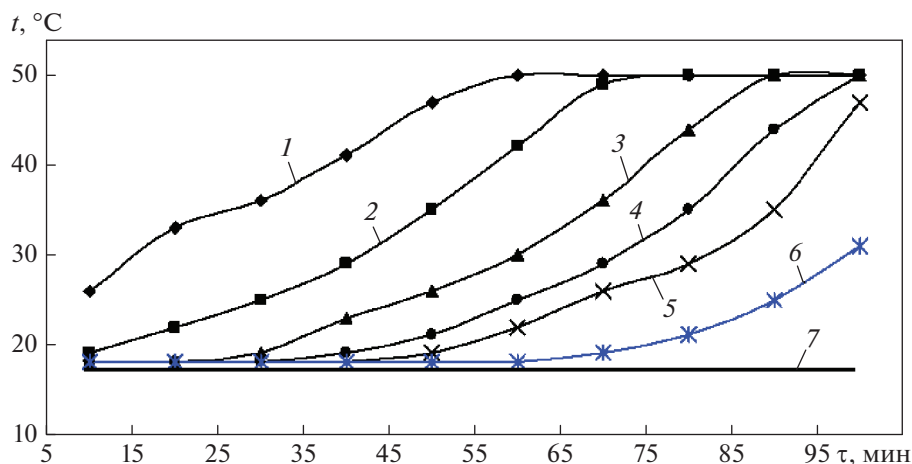
**Рис. 4.** Общий вид лабораторной установки

Температуру грунта  $t$  контролировали с помощью термомпар  $T_1$ – $T_5$  на разных расстояниях  $h$  относительно глубины залегания трубопровода (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 м). Температуру теплоносителя на входе в трубопровод и на выходе из него контролировали с помощью термомпар  $T_n$  и  $T_o$ . Температуру поверхности грунта определяли с помощью измерителя теплового потока.

Температура воды, подаваемой в трубопровод, составляла  $50^\circ\text{C}$ . Показания термомпар  $T_1$ – $T_5$ , ИТП и мультиметра фиксировали через равные промежутки времени (10 мин) в слое грунта (рис. 5). По

полученным экспериментальным данным видно, что температура поверхности грунта начинает повышаться через 60 мин. Вблизи от трубопровода температура песка повышается быстро, чем больше расстояние от трубопровода, тем медленнее изменяется температура песка.

По мере увеличения толщины грунта определить температуру с помощью термомпар  $T_1$ – $T_5$  становится труднее. Температура грунта  $\gamma$ , измеренная с помощью стандартного прибора (мультиметра DT-838L), расположенного на расстоянии 1 м от теплообменника, вообще не изменилась

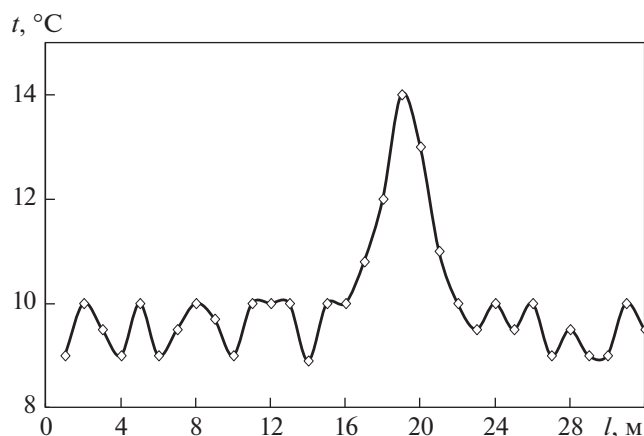


**Рис. 5.** Зависимость температуры песка от времени эксперимента  $\tau$ .  
 Термопары: 1 —  $T_1$ ; 2 —  $T_2$ ; 3 —  $T_3$ ; 4 —  $T_4$ ; 5 —  $T_5$ ; 6 — ИТП; 7 — мультиметр DT-838L;  $h$ , м: 1 — 0.1; 2 — 0.2; 3 — 0.3; 4 — 0.4; 5 — 0.5; 6, 7 — 1.0

(из-за низкой чувствительности прибора). Температура поверхности грунта, измеренная с помощью ИТП, начала повышаться через 60 мин, что свидетельствует о более высокой чувствительности ИТП по сравнению со стандартным мультиметром DT-838L с хромель-алюмелевой термопарой.

Для апробации ИТП была проведена диагностика участка теплосетей района Кендала (г. Караганда) и определены места повреждения теплоизоляционной конструкции. Обследования выполняли в конце отопительного периода. Для оценки данных, полученных с помощью ИТП, был использован акустический датчик “Eureka-2R” компании “Теплотранзит-Караганда”.

На рис. 6 показано распределение температуры поверхности грунта по длине  $l$  участка тепло-



**Рис. 6.** Температура поверхности грунта по длине участка теплосети

сети. Максимальная температура наблюдалась на расстоянии 18–20 м от тепловых камер, зона термического воздействия трубопровода составила 3–4 м. Полученная зависимость температуры поверхности грунта позволяет судить о месте повреждения трубопровода, что было подтверждено при вскрытии участка тепловой сети.

Апробация измерителя теплового потока доказала его надежную работу и высокую чувствительность. Результаты проведенных измерений подтверждают принципиальную возможность использования предложенного прибора коммунальными эксплуатационными службами тепловых сетей.

### ВЫВОДЫ

1. Результаты испытаний предложенного измерителя теплового потока показали его надежную работу и высокую чувствительность.
2. По данным измерения температур почвы над обследуемыми прокладками теплотрасс с помощью измерителя теплового потока можно оперативно определять места утечки теплоносителя в окружающую среду, а также заблаговременно выявлять участки трубопроводов с неудовлетворительным состоянием их теплоизоляционных и ограждающих конструкций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проблемы** развития системы теплоснабжения и области применения существующих подходов теплосбережения в Республике Казахстан / С.Б. Ахметжанова, М.Б. Тусупбеков, Г.В. Строева, А.Б. Кысыков. Астана: ПРООН/ГЭФ, 2007.

2. **Программа** модернизации жилищно-коммунального хозяйства Республики Казахстан на 2011–2020 гг. Утв. 30.04.2011. № 473.
3. **Качественное** прогнозирование состояния участков подземных теплотрасс / В.В. Иванов, С.В. Шкробко, Л.А. Чернышова, С.В. Черныш // *Новости теплоснабжения*. 2001. № 3. С. 27–28.
4. **Герашенко О.А., Грищенко Т.Г.** Приборы для тепловых измерений. Киев: Час, 1991.
5. **Герашенко О.А.** Основы теплотри. Киев: Наукова думка, 1984.
6. **Пат. РК № 1588.** Измеритель теплового потока / Б.Р. Нусупбеков, Д.Ж. Карабекова, А.К. Хасенов, У.Б. Нусупбеков, О.Б. Аукеев // *Б.И.* 2017. № 4.
7. **Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Khasennov A.K.** Thermal methods and non-destructive testing instrumentation // *Meas. Tech.* 2016. V. 59. № 6. P. 644–648. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1024-z>
8. **Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Khasennov A.K.** Heat flow meter for the diagnostics of pipelines // *Proc. of SPIE Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*. Wilga, 2016. P. 348–354.

## Analysis of the Insulation State of Underground Pipelines in the Heating Network

D. Zh. Karabekova<sup>a,\*</sup>, P. A. Kisabekova<sup>a</sup>, B. R. Nusupbekov<sup>a</sup>, and A. K. Khasenov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Karaganda University, Karaganda, 100028 Kazakhstan

\*e-mail: karabekova71@mail.ru

**Abstract**—Numerous studies show that all the requirements for technical diagnostics of the state of heating networks and technological objects are currently satisfied by nondestructive testing methods, which are based on observation and automated registration of processes' temperature. Heat flow meters have a number of advantages compared with other devices that are based on nondestructive testing methods. They are distinguished by high sensitivity to changes in the thermophysical characteristics of controlled objects, the ability to conduct control without using an external energy source, efficiency, compactness, and ease of use. Several modifications of heat flux meters (HFM) based on a thermoelectric battery cell of a special design have been developed. A distinctive feature of HFM design is the presence of a thermoelectric battery converter equipped with a temperature-dependent and heating element whose active junctions are aligned with the receiving plate and whose passive junctions are in thermal contact with the heating element. An experimental model of an underground heat-insulating structure has been assembled to study the influence of the temperatures of the coolant and the environment, the depth of the pipelines, their technical parameters and the parameters of the surrounding soil on the nature of the distribution of the density of thermal radiation from the soil surface over heating networks. Experimental work on the calibration of thermocouples used to determine the temperature change in the soil and the calculation of the calibration coefficient of thermocouples and heat flow meter was carried out. The results of the study of the distribution and temperature change soil are presented. The developed device is designed to analyze the state of thermal insulation of heating networks' underground pipelines.

**Keywords:** nondestructive testing, thermoelectric battery converter, heating element, receiving plate, heat carrier, heating network, thermoEMF, heat flow meter