

УДК 536

Манешев И.О. – аспирант

E-mail: ivan-maneshev@yandex.ru

Правник Ю.И. – инженер

E-mail: Gust.Sim.@mail.ru

Садьков Р.А. – доктор технических наук, профессор

E-mail: Sadykov_R_A@mail.ru

Сафин И.А. – студент

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Еремин С.А. – главный инженер

E-mail: keo@Citydom.ru

МУП ПО «Казэнерго»

Адрес организации: 420021, Россия, г. Казань, ул. Тукая, д. 162

Экспериментальное определение коэффициентов теплопроводности и эффективности сверхтонких теплоизоляционных покрытий*

Аннотация

Представлена экспериментальная установка для определения коэффициентов теплопроводности и эффективности сверхтонких теплоизоляционных покрытий (СТП) с применением многослойной плоскопараллельной стенки и терморегулируемого источника теплоты, с измерением температуры термопарами между слоями стенки. Определены коэффициенты теплопроводности и эффективности теплоизоляции четырёх СТП: «Astratec», TSM «Ceramic», Teplos-top, Moutrical, с целью их взаимного сравнения и проверки предлагаемого способа определения этих коэффициентов аналогично исследовались пенополиуретановый (ППУ) и пенополистироловые (ППС) теплоизоляторы, теплофизические коэффициенты которых общеизвестны.

Ключевые слова: сверхтонкие теплоизоляционные покрытия, удельный тепловой поток, коэффициент теплопроводности, коэффициент эффективности теплоизоляции, многослойная плоскопараллельная стенка, поверхностная плотность потока теплоты.

Введение

Одним из способов энергосбережения является уменьшение потерь теплоты от его генерации до места потребления. С этой целью ведутся поиски новых высокоэффективных теплоизоляционных материалов, отвечающих современным требованиям. Правильное и точное экспериментальное исследование коэффициентов теплопроводности и эффективности таких материалов приобретает большое прикладное значение. В работе рассматривается способ определения этих коэффициентов для СТП и сравнение их с известными теплоизоляционными материалами.

Описание и работа экспериментальной установки

На рис. 1 показана установка для определения коэффициентов теплопроводности – λ_n и эффективности – η СТП. Основное устройство (У) установки включает: терморегулируемый электронагреватель 1; многослойную плоскопараллельную стенку (с. 1) и (с. 2) с теплоизоляцией 8 и термопарами ТП. Режим работы теплоисточника регулируется автотрансформатором 2, поддерживается постоянным с помощью стабилизатора 3 и контролируется амперметром 4 и мультиметром 5. Термопары соединяются с ТРМ 138 измерителем-регулятором 6, откуда сигнал передаётся на компьютер 7.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.В37.21.0296 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», 2009-2013.

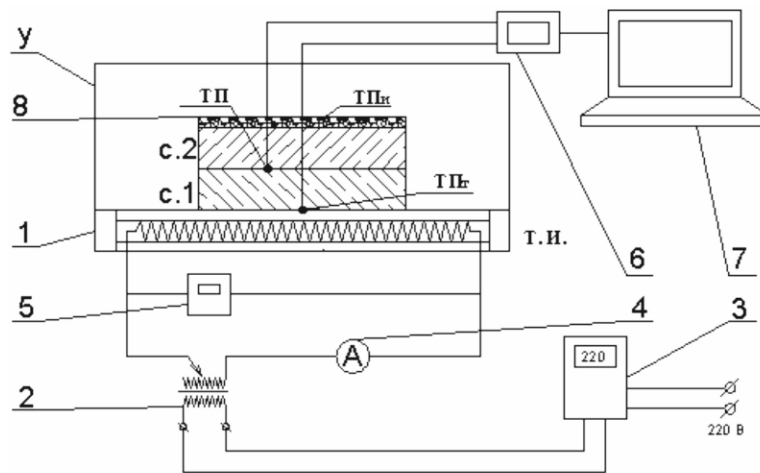


Рис. 1. Схема опытной установки для определения коэффициентов теплопроводности и эффективности СТП:

1 – терморегулируемый электронагреватель; 2 – ЛАТР; 3 – стабилизатор; 4 – амперметр; 5 – мультиметр; 6 – измеритель-регулятор ТРМ 138; 7 – компьютер; с. 1 и с. 2 – слои стенки; 8 – теплоизоляция; У – устройство

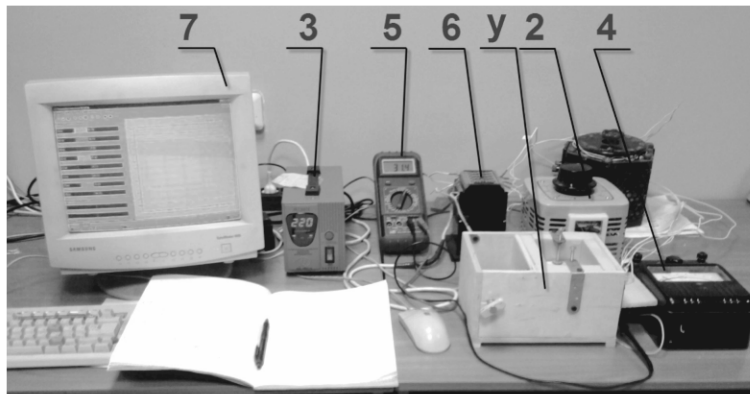


Рис. 2. Фотография установки для определения λ_n и η СТП:
У – устройство; 2 – ЛАТР; 3 – стабилизатор; 4 – амперметр; 5 – мультиметр; 6 – измеритель-регулятор ТРМ 138; 7 – компьютер

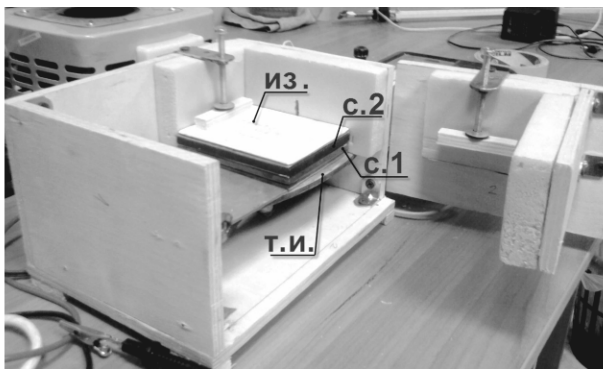


Рис. 3. Фотография устройства для определения λ_n и η СТП с теплоизоляцией, устройство открыто:
ИЗ. – изоляция; С. 1, С. 2 – слои стекла;
Т.И. – теплоисточник

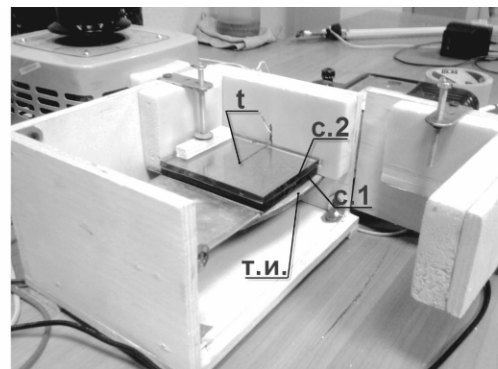


Рис. 4. Фотография устройства для определения λ_n и η СТП без теплоизоляции, устройство открыто:
t – точка измерения температуры термопарой; С. 1, С. 2 – слои стекла;
Т.И. – теплоисточник

Подготовка к экспериментам

Для измерения температуры между слоями в многослойной плоскопараллельной стенке термопарами (хромель-копелевые ХК) использовались металлические пластины (стальные), равные толщине измерительного спая термопары, с прорезью в них, позволяющих измерять температуру в центре поверхности слоя (рис. 4). Благодаря пластинам достигалось плотное прилегание слоёв и минимизировалось влияние окружающей среды на показание термопар [1].

Измерение температур наружной поверхности слоя производилось термопарами, контактным термометром ТК-5.01 и пирометром (рис. 5). Показания температур, измеренных термопарой, отличались на 9-11 °С от показаний термометра ТК-5.01 и пирометра. Очевидно, сказывалось влияние окружающей среды на термопару. Поэтому (рис. 5 а): температура наружной поверхности верхнего слоя определялась из выражения согласно закону Фурье (стационарный режим):

$$t_n = 2t - t_r, \quad (1)$$

Эта формула выведена при $\frac{\lambda_{c2}}{\delta_{c2}} = \frac{\lambda_{c1}}{\delta_{c1}}$.

При $\frac{\lambda_{c2}}{\delta_{c2}} \neq \frac{\lambda_{c1}}{\delta_{c1}}$ она будет:

$$t_n = t - \frac{\delta_{c2} \lambda_{c1}}{\lambda_{c2} \delta_{c1}} (t_r - t), \quad (2)$$

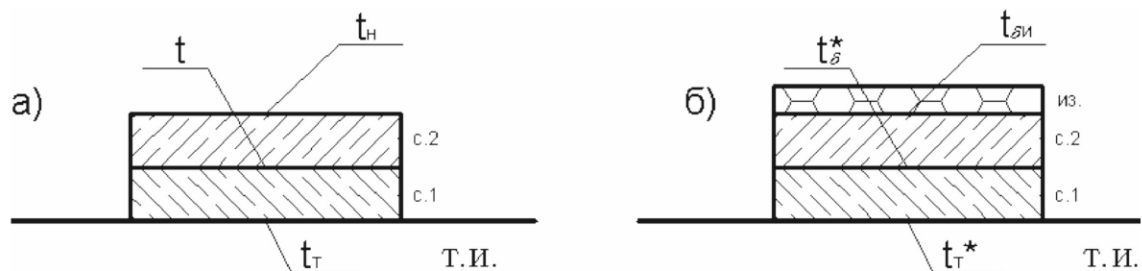


Рис. 5. Схема для определения коэффициента теплопроводности СТП:

Т.И. – теплоисточник; t_r и t_r^* – температура теплоисточника под первым слоем стекла;
С. 1 – первый слой стекла, С. 2 – второй слой стекла; t и t^* – температура между слоями стёкол,
 t_n – вычисляемая температура на наружной поверхности верхнего слоя стекла без применения теплоизоляции; t_n – температура контактной поверхности изоляции и поверхности верхнего слоя стекла

Теплоизолятор наносили на металлическую пластину толщиной $d_n=0,001$ м. Металл, имеющий высокий коэффициент теплопроводности, передаёт температуру практически без изменений [2]. Необходимое количество СТП аккуратно наносится на горизонтально установленную поверхность и равномерно распределяется по всей плоскости. В результате высыхания образуется ровная поверхность СТП без нарушения структуры материала.

Проверка установки на работоспособность проводилась по равенству удельных тепловых потоков в слоях (кроме слоя СТП) [3] во время экспериментов по определению λ_n и η . В экспериментах отклонения величин удельных тепловых потоков было не больше $\Delta q = \pm 4,5\%$, (определялось по выражению: $\Delta q = \pm \frac{q_1 - q_2}{\sum_1^n q_n / n} \cdot 100\%$, где числитель –

разность удельных тепловых потоков слоёв, знаменатель – среднеарифметическое этих потоков).

Известно, что равенство удельных тепловых потоков: $q_1=q_2$ в двухслойной плоскопараллельной стенке возможно в следующих случаях:

- 1) $\frac{\lambda_1}{\delta_1} = \frac{\lambda_2}{\delta_2}$ при $(t_1 - t_2) = (t_2 - t_3)$, хотя возможно $\lambda_1 \neq \lambda_2$ и $\delta_1 \neq \delta_2$;
- 2) $\frac{\lambda_1}{\delta_1} > \frac{\lambda_2}{\delta_2}$ при $(t_1 - t_2) < (t_2 - t_3)$ (при условии взаимокompенсации).

В случае с СТП удельный тепловой поток изоляции не равняется тепловым потокам слоёв, т.к. теплопроводность стекла $\lambda_c=0,74 \text{ Вт/м}^0\text{С}$ [3], толщина $d_c=0,0058 \text{ м}$, поэтому $\frac{\lambda_c}{\delta_c} = 127,59 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^0\text{С}$, у TSM Ceramic (по рекламным данным) $\lambda_n=0,001 \text{ Вт/м } ^0\text{С}$, а

$d_n=0,0005 \text{ м}$ и их отношение равно $\frac{\lambda_u}{\delta_u} = 2 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^0\text{С}$. Учитывая, что перепад температур на

изоляции по результатам проведённых экспериментов на разных режимах работы теплоисточника (60^0С , 90^0С и 150^0С) не превышает 10 градусов, о компенсации температурой не может быть и речи. Многочисленные эксперименты подтверждают это. Однако, если теплопроводность стекла приравнять к теплопроводности СТП, т.е. $\lambda_c/d_c=\lambda_n/d_n$ (в этом случае $d_c=0,37 \text{ м}$), то при равенстве удельных тепловых потоков можно получить искомую величину, близкую к значению рекламируемой. Это не противоречит науке (мало того, рекомендуется подбирать материал, по которому определяют коэффициент теплопроводности, близкий по термическому сопротивлению к искомому [3]). Это способ подгонки под желаемое. По-видимому, на данном этапе классическим способом, через равенство удельных тепловых потоков, определить коэффициент теплопроводности не удастся. Поэтому решили идти другим путём.

Определение коэффициента теплопроводности СТП

Рассмотрим удельные тепловые потоки в слоях многослойной плоскопараллельной стенки (рис. 5). Раскроем скобки в уравнении теплового потока одного из слоёв:

$$q=(\lambda_{c2}/d_{c2})(t_r-t)=(\lambda_{c2}/d_{c2})t_r-(\lambda_{c2}/d_{c2})t.$$

Получим разность поверхностной плотности теплоты нижней и верхней поверхностей слоя [4], которые являются изотермическими полями температур. В контактной части поверхностей двух слоёв (рис. 5) эти поверхностные плотности теплоты выражаются через теплопроводности материалов обоих слоёв.

Для определения коэффициента теплопроводности СТП составили двухслойную плоскопараллельную стенку из слоёв стекла (рис. 5) одинаковой толщины $d_c=0,0058 \text{ м}$ и коэффициентом теплопроводности $\lambda_c=0,74 \text{ Вт/м}^0\text{С}$. (Опыты проводились и на стёклах $d_c=0,00226 \text{ м}$, и $d_c=0,00375 \text{ м}$. Результаты практически были те же). На верхнем слое стекла (с. 2) (рис. 5 б) прикреплялась металлическая пластина с нанесённым на ней слоем СТП. Эксперимент проводился следующим образом: сначала нагревалась стенка без изоляции до максимальных значений температур, определялась температура t_n по (1), устанавливалась пластина, покрытая слоем исследуемой изоляции, и на том же термостационарном режиме снимались показания температур в соответствующих точках.

Поверхностная плотность тепла θ , проходящая через наружную поверхность верхнего слоя (с. 2) без изоляции в единицу времени (рис. 5 а), будет:

$$\theta = \frac{\lambda_{c2}}{\delta_{c2}} t_n,$$

где: t_n – температура неизолированной наружной поверхности верхнего слоя стекла, вычисленная по (1).

То же самое с изоляцией (рис. 5 б) будет:

$$\theta_u^* = \frac{\lambda_{c2}}{\delta_{c2}} t_{\delta u}^*,$$

где t_n – температура изолированной наружной поверхности верхнего слоя при одном и том же термостационарном режиме источника тепла.

То же самое на контактной поверхности СТП под изоляцией (рис. 5 б) будет:

$$\theta_u = \frac{\lambda_u}{\delta_u} t_{\delta u}.$$

Условие сохранения тепловой энергии в контактной поверхности верхнего слоя стекла и СТП (рис. 5 б) с учётом поверхностной плотности тепла неизолированной поверхности слоя стекла (рис. 5а) можно представить равенством, подтверждённым опытами:

$$\theta_u^* = \theta + \theta_u.$$

Отсюда:

$$\theta_u = \theta_u^* - \theta,$$

подставляя их значения и решая, получим:

$$\lambda_u = \delta_u \frac{\lambda_{c2}}{\delta_{c2}} \left(1 - \frac{t_n}{t_{\delta u}} \right). \quad (3)$$

Определение коэффициента эффективности СТП

Коэффициент эффективности теплоизоляции [5] по определению выражается:

$$\eta_u = 1 - \frac{q_{cu}}{q_{\delta u}}, \quad (4)$$

где: q_{cu} и $q_{\delta u}$ – соответственно удельные тепловые потоки с теплоизоляцией и без неё.

Удельный тепловой поток без теплоизоляции (рис. 5 а) может быть выражен:

$$q_{\delta u} = \frac{\lambda_{c1}}{\delta_{c1}} (t_T - t) = \frac{\lambda_{c2}}{\delta_{c2}} (t_T - t),$$

где: t_T и t – температуры источника тепла и между слоями неизолированной многослойной стенки (рис. 5 а); $\frac{\lambda_{c1}}{\delta_{c1}} = \frac{\lambda_{c2}}{\delta_{c2}}$.

Удельный тепловой поток с применением теплоизоляции (рис. 5 б) при том же термостационарном режиме работы источника тепла будет:

$$q_{cu} = \frac{\lambda_{c2}}{\delta_{c2}} (t_{\delta}^* - t_{\delta u}),$$

где: t_{δ}^* и $t_{\delta u}$ – температуры между слоями в контактных поверхностях слоёв стекла и между слоем стекла и изоляции. Подставляя их значения в (4) и решая, получим:

$$\eta_u = 1 - \frac{t_{\delta}^* - t_{\delta u}}{t_T - t}. \quad (5)$$

Результаты измерений и расчётов в таблице.

Таблица

Результаты определений коэффициентов теплопроводности и эффективности теплоизоляторов

Материал	TSM Ceramic	Astratec	Teplos-Top	Moutrical	ППС	ППУ	ТЗП	ППУ-1
δ м	0,00075	0,0006	0,0005	0,0007	0,006	0,0045	0,00372	0,0027
t_T °C	87,38	86,11	74,02	76,07	74,88	73,96	97,39	90,41
λ_u Вт/м °C	0,0056	0,0036	0,0026	0,00542	0,035	0,0525	0,0759	0,048
η_u %	10,5	18	24,49	31,2	47,0	49,0	27,3	44,7

Здесь λ_n и η_n определялись по (3) и (5) соответственно. Величина отклонений удельных тепловых потоков в слоях не превышала $\Delta q = \pm 4,5$ %. (Равенство удельных тепловых потоков и максимальное значение температуры обоих термостационарных режимов работы устройства являются критерием кондиционности эксперимента).

Все эксперименты проводились в помещении с обычными бытовыми условиями при температуре окружающей среды $t_0 = +17 \div +23$ °С.

Заслуживает внимания эксперимент по определению теплофизических свойств теплоизолятора, состоящего из СТП Astratec и традиционного теплоизолятора пенополиуретана (ППУ). Коэффициент теплопроводности этой двухслойной комбинации теплоизоляции равен $\lambda_n = 0,05$ Вт/м°С, а коэффициент эффективности теплоизоляции $\eta_n = 70$ %, который превышает коэффициенты эффективности обоих теплоизоляторов по отдельности (табл.).

Заключение

Собранная экспериментальная установка обеспечивает погрешность измерений, которая оценивалась в соответствии с требованиями ГОСТ 8.310-90. Расчёты проводились по среднеквадратичному отклонению от номинала, не выходящему из доверительного интервала 0,95, с использованием закона Стьюдента (Госсета) [6] по десяти выборкам.

В результате получили погрешности измерений: температур $\delta t = \pm 0,2$ %; удельных тепловых потоков $\delta q \leq \pm 3$ %; коэффициента теплопроводности $\delta \lambda = \pm 5$ % и коэффициента эффективности теплоизоляции $\delta \eta = \pm 4$ %.

Многочисленными экспериментами подтверждена работоспособность разработанной установки. Диапазон измерений коэффициента теплопроводности этой установки лежит в пределах **0,09 ÷ 0,001** Вт/м °С. Надо помнить, что толщина слоя СТП должна быть равной или близкой к толщине слоя покрытия рабочего узла.

Данная методика определения коэффициентов теплопроводности и эффективности может использоваться для экспресс-анализа интересующих теплоизоляторов, ожидаемый коэффициент теплопроводности которых укладывается в указанный диапазон измерений установки.

Применяемый способ отличается от стандартных тем, что:

- теплоизоляция исследуется в нём, находясь в своём рабочем состоянии;
- свойства теплоизоляции определяются по результатам влияния её на изолируемый объект;
- возможно получение коэффициентов теплопроводности и эффективности теплоизоляции при температурных режимах источника тепла и окружающей среды, имитирующих работу теплоизоляции в производственных условиях;
- на установке можно определить толщину теплоизоляции, обеспечивающую наибольшую эффективность;
- есть возможность определить температуру теплоносителя, выдерживаемую теплоизоляцией;
- найденные коэффициенты теплопроводности (таблица) традиционных теплоизоляторов пенополистирола ППС, пенополиуретана ППУ и ППУ-1, близкие к стандартным значениям, позволяют надеяться, что указанный способ определения коэффициента теплопроводности достоверен.

Коэффициент теплопроводности теплоизолятора Astratec, найденный ВолГАСУ [7], $\lambda = 0,02$ Вт/м°К по прибору ИТП-МГ4 и не мог получиться иным, т.к. диапазон измерения прибора 0,02-1,5 Вт/м °К и точность измерений ± 7 %. Нами был получен коэффициент теплопроводности TSM Ceramic тоже в этих пределах по прибору ИТС-1, который имеет диапазон измерений 0,02-1,5 Вт/м °К и точность измерений ± 5 %.

Список литературы

1. Правник Ю.И., Садыков Р.А., Манешев И.О., Ерёмин С.А. Устройство для измерения термopамами температуры между плоскими твердыми телами. Патент на полезную модель РФ № 117618 от 27.06.12.
2. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Изд-во «Наука», 1964. – 247 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Изд-во «Энергия», 1977. – 343 с.
4. Воронин Г.И. Основы термодинамики и теплопередачи. – М.: «Оборонкиз», 1958. – 342 с.
5. Злобин А.А., Курятов В.Н., Мальцев А.П., Медведева И.Ю., Романов Г.А. Примеры энергетического обследования промышленных предприятий // «Практика энергоаудита и энергосбережения», 2008, № 4 (8). – С. 20-21.
6. Зайдель А.М. Ошибки измерений физических величин. – Л.: Изд-во «Наука», 1974. – 107 с.
7. Определение теплофизических параметров теплоизоляционного материала «Астратек» нестационарными методами // http://www.astratek.ru/information/teplofizika_astrotek/ (дата обращения: 11.09.12).

Maneshev I.O. – post-graduate student

E-mail: ivan-maneshev@yandex.ru

Pravnik Y.I. – engineer

E-mail: Gust.Sim@mail.ru

Safin I.A. – student

Sadykov R.A. – doctor of technical science, professor

E-mail: Sadykov_R_A@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya str., 1

Eremin S.A. – chief engineer

E-mail: keo@Citydom.ru

MUE PA «Kazenergo»

The organization address: 420021, Russia, Kazan, Tukay str., 162

Experimental determination of coefficients of heat conductivity and efficiency of superthin heat-insulating coverings

Resume

Currently, the heat loss through the surface of heat that are heat transport artery, reaching 15-30 % of heating consumes more than 400 million tons of fuel per year, and the heat loss is approximately 62 mln.t.u.t. / year. All this is laid in the rate and is payable by the consumer.

Hence the importance of high-quality and high-performance insulation, the effectiveness of which is determined primarily by the thermal conductivity insulating material, which determines the required thickness of the insulation layer.

Hence the need to find more and more heat insulators with improved thermal properties.

And this in turn raises the problem of finding the thermal conductivity of the heat insulator. Obviously, there are hopes that superthin insulating coating in some way to meet these needs. Quite obviously follows from this problem of determining their thermal properties.

This article attempts to answer this challenge. The authors have created a design for the determination of thermal conductivity and efficiency of superthin insulating coatings. Developed a method for their determination. Conducted experiments to determine happy these coefficients for materials: TSM Ceramic, Astratec, Teplos-Top, Moutrical, PPP and PRP, which are close to the advertised. Of course, this work still requires further development and more trials. But the results gives us some hope.

Keywords: superthin insulating coating, heat flux, thermal conductivity, coefficient of thermal efficiency, multi-plane-parallel walls.

References

1. Pravnik Y.I., Sadykov R.A., Maneshev I.O., Eremin S.A. A device for measuring temperature with thermocouples between flat solids. Utility patent RF № 117618 from 27.06.12.
2. Koshkin N.I., Shirkevich M.G. Handbook of elementary physics. – M.: «Nauka», 1964. – 247 p.
3. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Fundamentals of Heat Transfer. – M.: Publishing House of the «energy», 1977. – 343 p.
4. Voronin G.I. Fundamentals of thermodynamics and heat transfer. – M.: «Oborongiz», 1958. – 342 p.
5. Zlobin A.A. Kuryatov V.N., Maltsev A.P., Medvedev I.Y., Romanov G.A. Examples of energy audits of industrial enterprises // «The practice of energy audits and energy saving», 2008, № 4 (8). – P. 20-21.
6. Seidel A.M. Measurement error of the physical quantities. – L.: Publishing House «Nauka», 1974. – 107 p.
7. Determination of thermal parameters of heat insulation material «Astratek» nonstationary methods // http://www.astratek.ru/information/teplofizika_astrotek/ (reference date: 11.09.12).