

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОМ

**А.В. Шарков, доктор технических наук, профессор;
В.А. Кораблёв, кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики.
А.С. Некрасов.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Целью исследования является проверка быстрого метода определения теплопроводности и теплового сопротивления ограждающих конструкций. Исследование включает в себя экспериментальную проверку полученной зависимости на одном эталонном (оптическое стекло ЛК-5) и двух строительных материалах (фрагмент кирпичной кладки и экструдированный пенополистирол).

Ключевые слова: тепловой поток, теплопроводность, тепловое сопротивление, ограждающая конструкция, измерение теплового потока, измерение теплопроводности, измерение теплового сопротивления

METHOD OF RAPID MEASUREMENT THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL RESISTANCE OF SHIELDING CONSTRUCTIONS

A.V. Sharkov; V.A. Korablev. Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics.

A.S. Nekrasov. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The aim of investigation the paper below deals with is testing of the rapid method of evaluation thermal conductivity and thermal resistance of shielding constructions. The investigation includes experimental verification equation on the one calibration and two construction materials.

Keywords: thermal flux, thermal conductivity, thermal resistance, shielding, heat flux measurement, thermal conductivity measurement, thermal resistance measurement

Установка для измерения эффективной теплопроводности теплоизоляционных материалов

Эффективная теплопроводность теплоизоляционных материалов (зернистых засыпок, волокнистых набивок, твердых пористых материалов, элементов составных сотовых конструкций) существенным образом зависит от ряда факторов, основными из которых являются: теплофизические свойства материала и газа, геометрические размеры ячеек и пор, уровень температуры теплоизоляционного слоя и градиенты температуры в нем, пространственная ориентация слоя или элементов конструкции по отношению к тепловому потоку, давление газа-наполнителя. Перенос тепловой энергии через слой материала или элементы конструкции может происходить одновременно за счет теплопроводности (по твердому и газовому компонентам конструкции), излучения и конвекции. Сложность строгого математического описания процессов теплопереноса в таких системах порождает необходимость разрабатывать приближенные методы расчета и проводить измерения их теплофизических свойств.

Установка, разработанная и изготовленная в Ленинградском институте точной механики и оптики, служит для измерения эффективной теплопроводности (теплового сопротивления) теплоизоляционных материалов в стационарном режиме в интервале температур от -60 до +90 °С. Образцы размером 250×250 мм с толщиной от 5 до 40 мм

располагаются между изотермическими поверхностями с известными температурами. Тепловой поток, проходящий через образец, измеряется тепломерами, расположенными с двух сторон образца, тепломеры работают по принципу «дополнительной стенки».

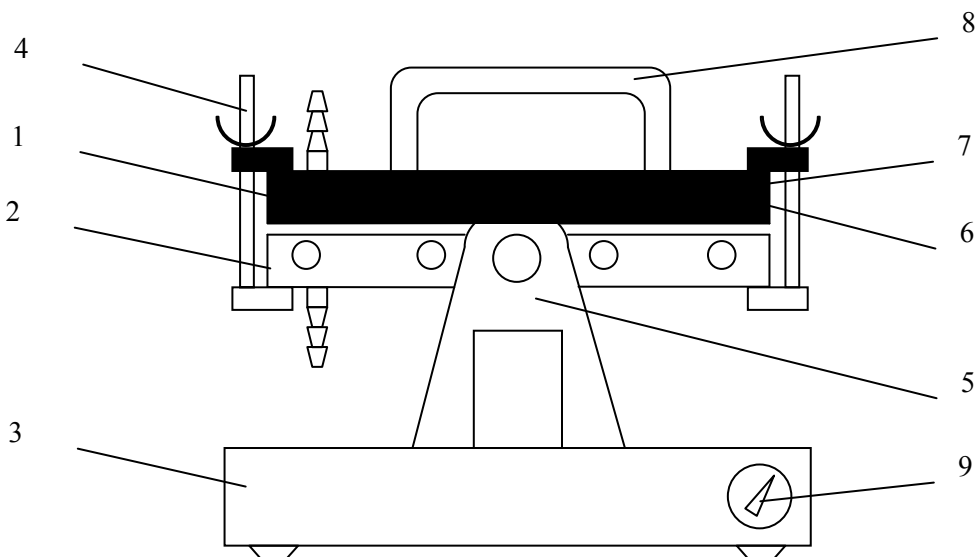


Рис. 1. Общий вид установки

Прибор (рис. 1) состоит из двух одинаковых термостатируемых плит 1 и 2, смонтированных на основании 3. Исследуемый образец размещается между плитами и зажимается винтами 4. Поворотное приспособление 5 позволяет ориентировать плиты в вертикальном и двух горизонтальных положениях (нагретая плита сверху и снизу). К боковым поверхностям плит привинчиваются винтами 6 металлические шторки 7. В шторках проделаны вырезы, позволяющие устанавливать их с зазором 0,5 мм друг от друга, несмотря на различную толщину испытуемых пластин. Плита 2 непосредственно связана с поворотным устройством. Плита 1 может сниматься с помощью рукояток 8 после освобождения винтов 4, что позволяет вложить образец между плитами. Все температурные измерения производятся при помощи термопар, холодные спаи которых помещены в массивный металлический блок. Переключатель 9 служит для поочередного подключения термопар к измерительному прибору. Термостатирование плит 1, 2 осуществляется пропусканием соответствующих жидкостей через каналы в плитах. Задание температур в интервале от 20 до 90 °С производится протекающей в плитах водой, в интервале от -30 до -20 °С через каналы плит пропускается раствор антифриза, охлажденный при помощи твердой углекислоты, в интервале температур от -30 до -60 °С используются пары жидкого азота. Вода и раствор антифриза подаются из термостатов, в которых поддерживаются нужные температуры с абсолютной погрешностью $\pm 0,1$ К. Пластины 1, 2 – многослойные, они состоят из медных пластин, обращенных к образцу тепломера и латунных пластин с каналами для протока жидкости. Плоскости медных пластин, обращенные друг к другу, полированы и хромированы. Тепломерами служат слои вакуумной резины толщиной 2 мм, приклеенные к металлическим пластинам клеем БФ-2. При работе прибора изменение удельного давления на слой вакуумной резины 4 не превышает $2 \cdot 10^3$ Па. В этих условиях изменение толщины слоя 4 составляет менее 0,01 мм.

Для измерения перепада температур на тепломере использован семиспайный термостолбик. Холодные спаи термостолбика вмонтированы в латунную пластину, горячие спаи – в медную. Electroды термостолбика проложены в двухканальных фарфоровых трубочках, а корольки спаев изолированы от металла слоем бумаги и клеем БФ-2. В медные пластины вмонтированы спаи термопар, измеряющих средние температуры пластин.

Вывод расчетных формул для теплового сопротивления и эффективной теплопроводности образца, расположенного между плитами, основан на анализе тепловых потоков, идущих между плитами. На рис. 2 представлены схемы тепловых потоков с учетом утечек тепла на торцах исследуемого образца и распределение температур во всех элементах

установки. Горячая 1 и холодная 2 плиты имеют температуры t_1' и t_2' : предполагаем, что температуры примыкающих к ним шторок 3 такие же. Обозначим Q_1''' , Q_1'' , Q_1' – тепловые потоки, идущие от горячей плиты 1 через шторки 3 в резину тепломера 4, медную пластину 5 и образец 6; Q_1''' , Q_1'' , Q_1' – тепловые потоки, идущие от образца 6, медной пластины 5 и резину тепломера 4 через шторки к холодной плите. Тепловые потоки через тепломеры на горячей и холодной пластине обозначены как Q_1 и Q_2 ; тепловой поток, прошедший через образец, – Q .

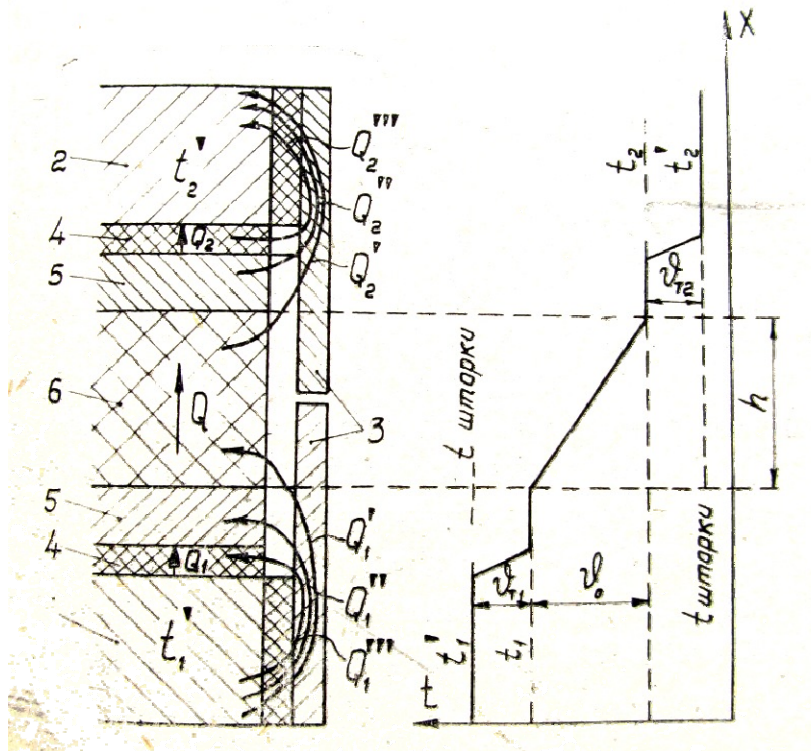


Рис. 2. Схемы тепловых потоков

Из уравнений теплового баланса получаются соотношения:

$$R = \frac{1}{K_c \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} + Ph \left(4 \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} + 1 \right)}, \quad (1)$$

или

$$R = \frac{1}{K_n \frac{\vartheta_2}{\vartheta_0} + Ph \left(4 \frac{\vartheta_2}{\vartheta_0} + 1 \right)}. \quad (2)$$

Здесь R – тепловое сопротивление всей системы, расположенной между спаями термопар, вмонтированных в медные пластины; ϑ_1 , ϑ_2 , ϑ_0 – перепады температур на тепломерах и образце; K_c , K_n – тепловые проводимости слоев резины на первом (съёмном), втором (неподвижном) тепломерах; P – поправочный коэффициент, учитывающий теплообмен с торца; h – расстояние между пластинами (высота образца).

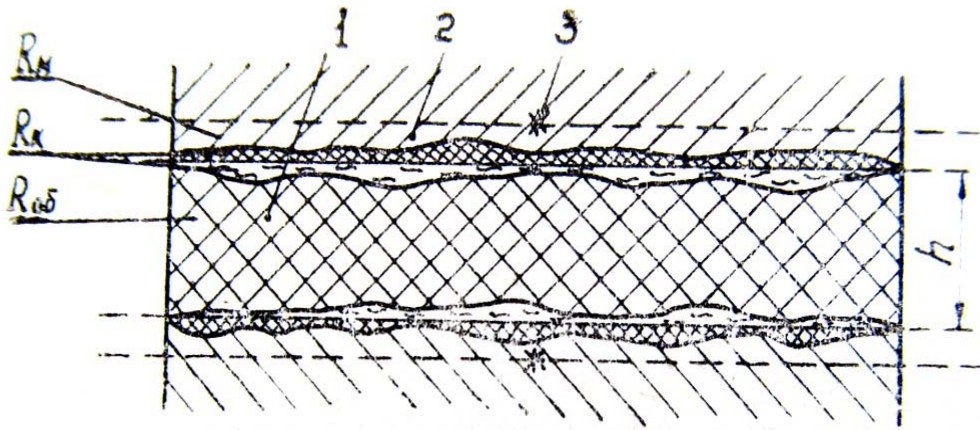


Рис. 3. Схема расположения слоев

На рис. 3 приведена схема расположения слоев. Здесь 1 – образец, обладающий неровными поверхностями; 2 – медные пластины прибора со своими неровностями на поверхностях; 3 – места заделки термопар. Между саями термопар заключено сложное тепловое сопротивление R , состоящее из теплового сопротивления образца $R_{об}$, тепловых сопротивлений участков медных пластин R_m , контактных тепловых сопротивлений между медными пластинами и образцом R_k . На рис. 4 видно, что тепловое сопротивление R определяется как:

$$R = R_{об} + 2R_m + 2R_k \quad (3)$$

Поскольку $2R_m$ – величина пренебрежимо малая по сравнению с $R_{об}$ и R_k , то эффективная теплопроводность сложной конструкции, представленной в приборе в виде образца, можно определить как:

$$\lambda = \frac{h}{R - 2R_k} \quad (4)$$

Из (1) – (4) получаем:

$$\lambda = h \left(K_c \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} + Ph \left(4 \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} + 1 \right) \right) \frac{1}{1 - \Delta\sigma_{к1}} \quad (5)$$

или

$$\lambda = h \left(K_c \frac{\vartheta_2}{\vartheta_0} + Ph \left(4 \frac{\vartheta_2}{\vartheta_0} + 1 \right) \right) \frac{1}{1 - \Delta\sigma_{к2}} \quad (6)$$

где

$$\Delta\sigma_{\kappa 1} = 2R_{\kappa} \left(K_c \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} + Ph \left(4 \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} + 1 \right) \right),$$

$$\Delta\sigma_{\kappa 2} = 2R_{\kappa} \left(K_c \frac{\vartheta_2}{\vartheta_0} + Ph \left(4 \frac{\vartheta_2}{\vartheta_0} + 1 \right) \right). \quad (7)$$

Здесь $\Delta\sigma_{\kappa 1}$, $\Delta\sigma_{\kappa 2}$ – поправки на контактное тепловое сопротивление.

Градуировка установки заключается в определении проводимостей тепломеров K_c и K_n и коэффициента P . Значение K_n определялось из опытов, проводимых при различных толщинах h горизонтальных воздушных прослоек, образованных пластинами 1 и 2 (рис. 1), поверхности которых были зачернены. Для задания величины h между пластинами устанавливались четыре мерные шайбы из текстолита. В градуировочных опытах температуры поддерживались равными 25 °С на несъемной и 55 °С на съемной плитах. Поскольку менее нагретая пластина находилась внизу, то конвекция воздуха в полости отсутствовала, и эквивалентная теплопроводность прослойки $\lambda_{\text{эк}}$ рассчитывалась по формуле:

$$\lambda_{\text{эк}} = \lambda_{\text{в}} + 5,67 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{12} \frac{h}{t_1 - t_2} \left(\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right),$$

где $\lambda_{\text{в}}$ – теплопроводность воздуха [1] при температуре $t_m = 0,5(t_1 + t_2)$; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты прослойки; φ_{12} – коэффициент облученности.

Используя результаты опытов при двух толщинах прослойки, можно определить K_n и P , полагая, что $2R_{\kappa} = 0$:

$$K_{n1} = \lambda_{\text{эк1}} \frac{\vartheta_0}{h_1 \vartheta_2'} - Ph_1 \left(4 + \frac{\vartheta_0}{\vartheta_2'} \right), K_{n2} = \lambda_{\text{эк2}} \frac{\vartheta_0}{h_2 \vartheta_2''} - Ph_2 \left(4 + \frac{\vartheta_0}{\vartheta_2''} \right),$$

$$K_n = 0,5(K_{n1} + K_{n2})$$

$$P = \left(\lambda_{\text{эк1}} \frac{\vartheta_0}{h_1 \vartheta_2'} - \lambda_{\text{эк2}} \frac{\vartheta_0}{h_2 \vartheta_2''} \right) \left(h_1 \left(4 + \frac{\vartheta_0}{\vartheta_2'} \right) - h_2 \left(4 + \frac{\vartheta_0}{\vartheta_2''} \right) \right).$$

Здесь λ_0 , λ_2' , λ_2'' – перепады температур на образцах, на тепломере, находящемся на съемной плите, при толщинах воздушной прослойки h_1 и h_2 .

Значения проводимостей K_c тепломера на съемной плите определялись в зависимости от ее температуры в интервале от -60 °С до +90 °С. Температура на несъемной плите во всех опытах оставалась равной 25 °С, а температура на съемной плите варьировалась в указанном интервале. По формулам (5) и (6) рассчитывались значения K_c для разных значений температур при величине K_n , определенной при температуре 25 °С. Зависимость $K_c = f(t)$ оказалась линейной с температурным коэффициентом β . Так как слои резины в обоих тепломерах изготавливались одинаковыми, то приняли коэффициент β равным для обоих тепломеров.

Для установки, изготовленной в Ленинградском институте точной механики и оптики, получены значения: $K_n=(102\pm 2)(1-6\cdot 10^{-4}t)$, Вт/м³·К; $K_c=(89\pm 2)(1-6\cdot 10^{-4}t)$, Вт/м³·К; $p=(-8\pm 2)$, Вт/м³·К при доверительной вероятности $\alpha_0=0,95$.

Значение теплового сопротивления $2R_k$ не является величиной постоянной для прибора, поскольку может зависеть от чистоты и точности обработки поверхности образца, применяемой смазки и ряда других факторов. Величину $2R_k$ для исследуемых образцов можно определить расчетным путем [2] или при помощи градуировочных опытов с материалами с известной теплопроводностью.

В качестве примера приведем результаты градуировочного опыта с образцом из органического стекла. Температуры на плитах прибора поддерживались постоянными, равными 25 и 55 °С. Значение теплопроводности органического стекла при температуре 40 °С, $\lambda_{oc}=0,196$ Вт/м·К [3]. Высота образца $h=18$ мм. Из формул (6) и (7) получаем:

$$2R_k = \left(K_n \frac{\vartheta_2'''}{\vartheta_0} + Ph \left(4 \frac{\vartheta_2'''}{\vartheta_0} + 1 \right) \right)^{-1} - \frac{h}{\lambda_{oc}}, \quad (8)$$

здесь λ_2''' – перепад температур на тепломере несъемной плиты в опыте с образцом из органического стекла. После подстановки результатов измерений в расчетную формулу (8) получаем $2R_k=0,0030\pm 0,0005$ м²·К/Вт, при $\alpha_0=0,95$.

Проведенные исследования показали, что на представленной установке возможно проводить измерения эффективной теплопроводности теплоизоляционных материалов в диапазоне 0,03–1,0 Вт/м·К при температурах от -60 до +90 °С с относительной погрешностью менее 7 % [3].

Исследование теплопроводности стекла ЛК-5

Для градуировки прибора, оценки контактных сопротивлений и определения боковых потерь в среду использовалось оптическое стекло ЛК-5. Размеры образца составляют 250×250×40 мм. Для уменьшения контактных сопротивлений использовалась теплопроводная паста КПТ-8. Образец исследовался в горизонтальном положении, верхняя плита прибора термостатировалась при температуре 50 °С, нижняя – при температуре окружающей среды. Боковые плоскости образца были теплоизолированы 10 мм слоем экструдированного пенополистирола. Замеры показаний производились каждые 10 мин в течение 80 мин.

Исходя из полученных данных и известных параметров, можно оценить боковые потери и контактные сопротивления. Примем температуру на внутренней поверхности бокового теплоизолятора равной средней температуре образца, $T_{средн}=38$ °С, на внешней – равной температуре окружающей среды, $T_{среды}=26$ °С. Из геометрических размеров образца можно определить его боковую площадь, $S_{бок}=0,04$ м². Теплопроводность боковой изоляции равна $\lambda_{бок.изол.}=0,03$ Вт/м·К, а толщина $\delta_{бок.изол.}=0,01$ м. Тогда потери через боковые поверхности равны:

$$Q_{бок} = \frac{\lambda_{бок.изол.} (T_{средн} - T_{среды}) S_{бок}}{\delta_{бок.изол.}} = \frac{0,03 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} (38^\circ\text{С} - 26^\circ\text{С}) \cdot 0,04 \text{ м}^2}{0,01 \text{ м}} = - 1,44 \text{ Вт.}$$

Как показали измерения, с учетом поправки на боковой теплообмен, входящий поток отличается от выходящего в установившемся стационарном режиме примерно на 7 %, что лежит в пределах инструментальной погрешности прибора.

Сумма тепловых сопротивлений между плитами прибора будет равна сумме контактных сопротивлений и сопротивления образца $R_{\Sigma}=R_{\text{контакт}}+R_{\text{обр.}}$. Сопротивление образца можно определить, зная толщину, геометрические размеры и теплопроводность [1].

$$R_{\text{обр.}} = \frac{\delta_{\text{обр.}}}{\lambda_{\text{обр.}} S_{\text{обр.}}} = \frac{0,04 \text{ м}}{1,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \cdot 0,0625 \text{ м}^2} = 0,53 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$$

где $\lambda_{\text{обр.}}$ и $S_{\text{обр.}}$ – теплопроводность и площадь образца соответственно.

Суммарное тепловое сопротивление можно определить, зная расстояние между плитами прибора $\delta_{\Sigma}=0,041$ м, суммарную теплопроводность $\lambda_{\Sigma}=1,05$ Вт/м·К и площадь образца $S_{\text{обр.}}$.

$$R_{\Sigma} = \frac{\delta_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma} S_{\text{обр.}}} = \frac{0,041 \text{ м}}{1,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \cdot 0,0625 \text{ м}^2} = 0,62 \text{ К/Вт.}$$

Отсюда $R_{\text{контакт}}=R_{\Sigma}-R_{\text{обр.}}=0,62 \text{ К/Вт}-0,53 \text{ К/Вт}=0,09 \text{ К/Вт}$.

Исходя из поправки на контактное сопротивление, можно определить теплопроводность образца, опираясь на экспериментальные данные по формуле:

$$\lambda_{\text{обр.}} = \frac{\delta_{\text{обр.}}}{\frac{\delta_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}} - R_{\text{контакт}} S_{\text{обр.}}} \quad (9)$$

Из результатов видно (рис. 5), что стационарный режим с погрешностью менее 10 % наступает через один час наблюдений. Важно отметить, что полусумма потоков на гранях образца становится постоянной с погрешностью менее 7 % примерно через 20 мин после начала эксперимента. В результате расчета получилось $\lambda_{\text{обр.}}=1,2\pm 0,1$ Вт/м·К.

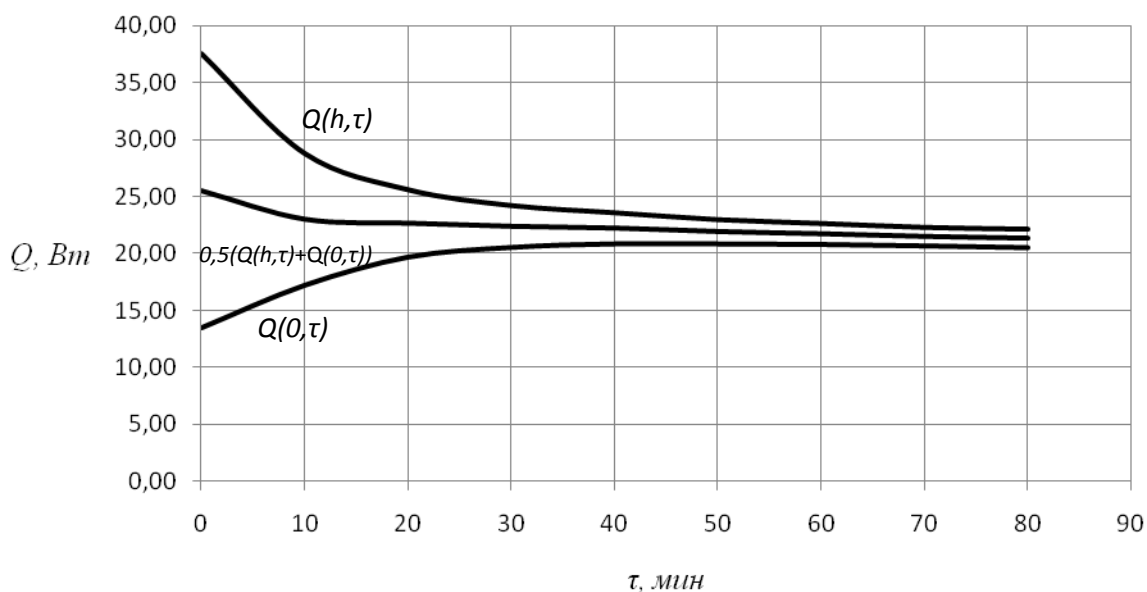


Рис. 5. Потоки на гранях стекла ЛК-5 и их полусумма

Этот факт означает, что, ориентируясь на полусумму потоков, можно определить теплопроводность образца намного раньше момента наступления стационарного режима. Теплопроводность образца при вычислении с помощью полусуммы потоков равна $\lambda_{обр}=1,10\pm 0,07$ Вт/м·К.

Исследование теплопроводности кирпичной кладки

Фрагмент кирпичной кладки представляет собой два кирпича с размерами 120×250×65 мм каждый. Для уменьшения контактных сопротивлений использовалась теплопроводная паста КПП-8. Образец исследовался в горизонтальном положении, нижняя плита прибора термостатировалась при температуре 50 °С, верхняя – при температуре окружающей среды. Боковые плоскости образца были теплоизолированы 10 мм слоем экструдированного пенополистирола. Замеры показаний производились каждые 10 мин в течение 5 ч.

Исходя из полученных данных и известных параметров, можно оценить боковые потери и контактные сопротивления. Примем температуру на внутренней поверхности бокового теплоизолятора равной средней температуре образца, $T_{средн}=39$ °С, на внешней – равной температуре окружающей среды, $T_{среды}=28$ °С. Из геометрических размеров образца можно определить его боковую площадь, $S_{бок}=0,0637$ м². Теплопроводность боковой изоляции равна $\lambda_{бок.изол.}=0,03$ Вт/м·К, а толщина $\delta_{бок.изол.}=0,01$ м. Тогда, потери через боковые поверхности равны:

$$Q_{бок} = \frac{\lambda_{бок.изол.} (T_{средн} - T_{среды}) S_{бок}}{\delta_{бок.изол.}} = \frac{0,03 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} (39^\circ\text{С} - 28^\circ\text{С}) \cdot 0,0637 \text{ м}^2}{0,01 \text{ м}} = 2,1 \text{ Вт.}$$

Как стало видно из измерений, с учетом поправки на боковой теплообмен, входящий поток отличается от выходящего в стационарном режиме примерно на 7 %, что лежит в пределах инструментальной погрешности прибора.

Контактные сопротивления можно оценить, опираясь на предыдущий опыт, они будут одного порядка, $R_{контакт}=0,1\dots 0,2$ К/Вт. Исходя из поправки на контактное сопротивление, можно определить теплопроводность образца, опираясь на экспериментальные данные, по формуле (9).

Из результатов видно (рис. 6), что стационарный режим с погрешностью менее 10 % наступает через 190 мин наблюдений. Важно отметить, что полусумма потоков на гранях образца становится постоянной с погрешностью около 7 % менее чем через 120 мин после начала эксперимента. В результате расчета получилось $\lambda_{обр.}=1,0\pm 0,1$ Вт/м·К.

Этот факт означает, что, ориентируясь на полусумму потоков, можно определить теплопроводность образца намного раньше момента наступления стационарного режима. Теплопроводность образца при вычислении с помощью полусуммы потоков равна $\lambda_{обр}=0,98\pm 0,07$ Вт/м·К.

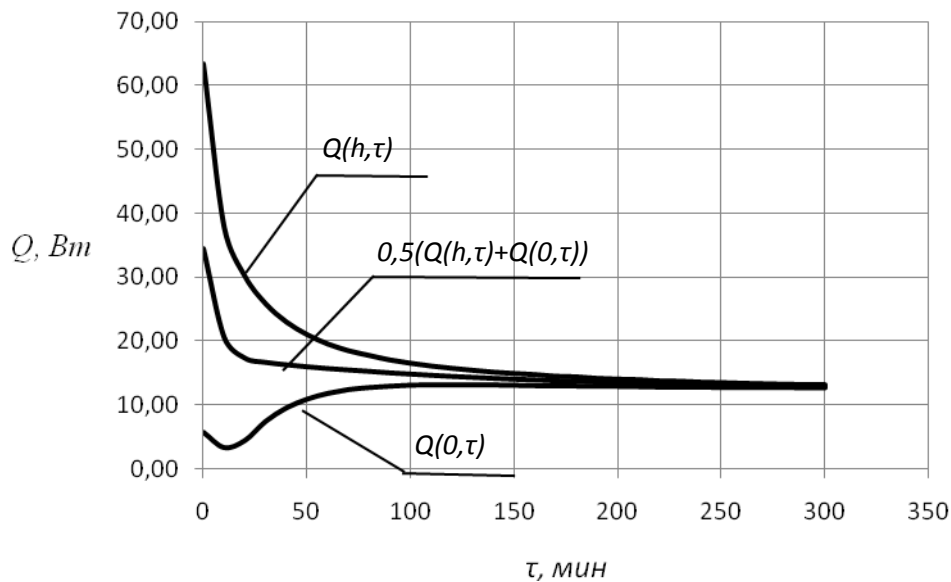


Рис. 6. Потоки на поверхностях фрагмента кирпичной вкладки и их полусумма

Исследование теплопроводности экструдированного пенополистирола

Фрагмент теплоизоляции из экструдированного пенополистирола представляет собой часть листа теплоизоляции с размерами $250 \times 250 \times 20$ мм. Для уменьшения контактных сопротивлений использовалась теплопроводная паста КПТ-8. Образец исследовался в горизонтальном положении, верхняя плита прибора термостатировалась при температуре 70°C , нижняя – при температуре окружающей среды. Боковые плоскости образца были теплоизолированы 10 мм слоем экструдированного пенополистирола. Замеры показаний производились каждые 10 мин в течение 5 ч (рис. 7).

Исходя из полученных данных и известных параметров, можно оценить боковые потери и контактные сопротивления. Примем температуру на внутренней поверхности бокового теплоизолятора равной средней температуре образца, $T_{\text{средн}}=48^\circ\text{C}$, на внешней – равной температуре окружающей среды, $T_{\text{среды}}=26,5^\circ\text{C}$. Из геометрических размеров образца можно определить его боковую площадь, $S_{\text{бок}}=0,04\text{ м}^2$. Теплопроводность боковой изоляции равна $\lambda_{\text{бок.изол.}}=0,03\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, а толщина $\delta_{\text{бок.изол.}}=0,01\text{ м}$. Тогда потери через боковые поверхности равны:

$$Q_{\text{бок}} = \frac{\lambda_{\text{бок.изол.}}(T_{\text{средн}} - T_{\text{среды}})S_{\text{бок}}}{\delta_{\text{бок.изол.}}} = \frac{0,03\text{ Вт/м}\cdot\text{К}(48^\circ\text{C} - 26,5^\circ\text{C}) \cdot 0,04\text{ м}^2}{0,01\text{ м}} = 1,29\text{ Вт.}$$

Из результатов измерений стало видно, что с учетом поправки на боковой теплообмен входящий поток отличается от выходящего в установившемся стационарном режиме примерно на 17 %.

Контактные сопротивления можно оценить, опираясь на предыдущий опыт, они будут одного порядка, $R_{\text{контакт}}=0,1\text{ К/Вт}$. Исходя из поправки на контактное сопротивление, можно определить теплопроводность образца, опираясь на экспериментальные данные по формуле (9).

Из результатов видно, что стационарный режим с погрешностью менее 20 % наступает через 20 мин наблюдений. Важно отметить, что полусумма потоков на гранях

образца становится постоянной с погрешностью менее 10 % менее чем через 10 мин после начала эксперимента. В результате расчета получилось $\lambda_{обр.}=0,04\pm 0,01$ Вт/м·К.

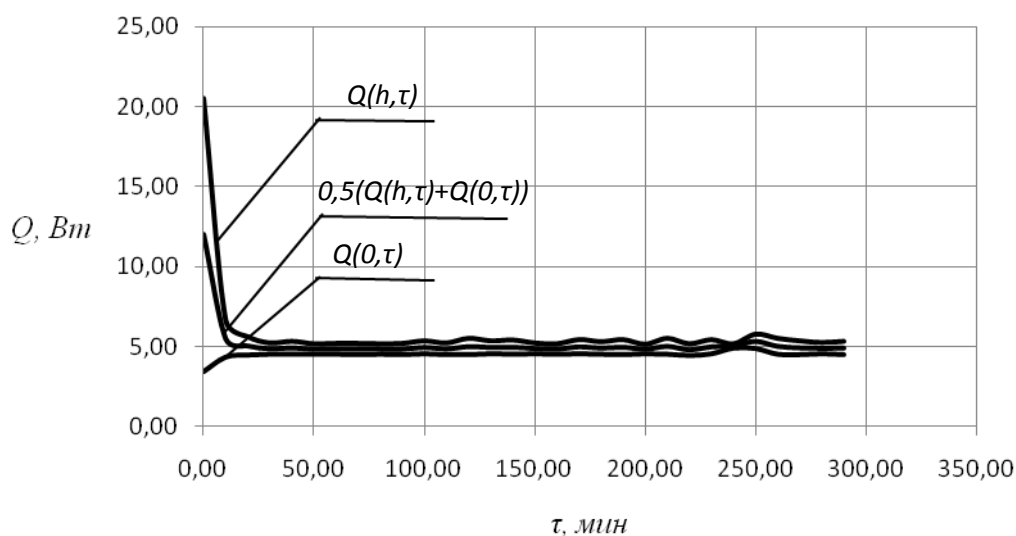


Рис. 7. Поток на поверхностях фрагмента теплоизоляции из экструдированного пенополистирола

Этот факт означает, что, ориентируясь на полусумму потоков, можно определить теплопроводность образца намного раньше момента наступления стационарного режима. Теплопроводность образца при вычислении с помощью полусуммы потоков равна $\lambda_{обр.}=0,04\pm 0,01$ Вт/м·К.

В результате лабораторных испытаний подтверждена эффективность способа и его возможность многократно ускорить процесс определения теплопроводности и теплового сопротивления. Описанный способ успешно прошел экспертизу по существу, патент на изобретение ожидается.

Литература

1. Теплопроводность газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик [и др.]. М.: Изд-во стандартов, 1970.
2. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977.
3. Установка для измерения эффективного коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов / А.Ф. Бегункова [и др.] // Приборостроение. 1983. № 4. С. 84–88.
4. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий): учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1974. 320 с.
5. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. М.; Л.: Гос. науч.-техн. изд-во, 1957. 244 с.