

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДОМ АВТОМОДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Г. И. Васильев, Ю. А. Демьянов, В. И. Курнаков,
А. В. Малахов, Х. А. Рахматулин, А. Н. Руминский

(Москва)

Существующие методы экспериментального определения термических коэффициентов материалов в большинстве случаев основаны на результатах, вытекающих из анализа частных решений линейного уравнения теплопроводности (методы регулярного режима, неограниченного эталона, мгновенного источника и др.) [1-3]. Эти методы имеют ряд недостатков: сложность аппаратуры и эксперимента, особенно для случая высоких температур, где его осуществление весьма затруднительно, возможность получения из единичного эксперимента только одного значения коэффициента теплопроводности (при температуре нагретого образца) и, что наиболее существенно, исходя из условия независимости теплофизических коэффициентов от температуры. Из методов, предполагающих переменность теплофизических коэффициентов, известен метод О. А. Краева для определения температуропроводности, который основан на приближенном решении нелинейного уравнения теплопроводности для неограниченного цилиндра [4-5]. В настоящей статье рассматривается метод определения коэффициента теплопроводности, основанный на использовании точного нелинейного уравнения теплопроводности [6], позволяющий применять сравнительно простые средства экспериментирования. Приводятся опытные данные по теплопроводности пеношамота с начальным удельным весом $\gamma_0 = 820 \text{ кг/м}^3$ в интервале температур $50 \div 750^\circ \text{C}$.

При использовании жидкостей, имеющих большой коэффициент теплоотдачи при конденсации (например, вода), предложенным методом можно определять коэффициенты теплопроводности не только теплоизоляторов, но и материалов, имеющих относительно высокую теплопроводность (близкую к теплопроводности металлов).

1. Сущность рассматриваемого метода заключается в следующем. Испытуемый образец выбирается в такой форме, чтобы за время измерений в его центральной части процесс распространения тепла происходил так же, как в полубесконечном стержне (одномерный случай), т. е. поперечные размеры и высота должны быть много больше толщины прогрева образца за время эксперимента. Например, за образец можно взять достаточно толстую прямоугольную пластинку. В течение эксперимента температура нагреваемой поверхности образца поддерживается постоянной.

Из теории теплопроводности (см., например, [7]) на основании анализа размерностей следует, что в рассматриваемом случае процесс распространения температуры в испытуемом образце будет происходить по закону (автомоделльное решение)

$$T = T(\xi), \quad \xi = \frac{x}{\sqrt{t}}$$

Здесь x — расстояние точки тела от нагреваемой поверхности, t — время.

В силу отмеченного факта уравнение распространения тепла, являющееся в общем случае нелинейным уравнением в частных производных второго порядка, для данного эксперимента сводится к обыкновенному

$$c_p \gamma \frac{dT}{d\xi} = - \frac{2}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left(\lambda \frac{dT}{d\xi} \right) \quad (1.1)$$

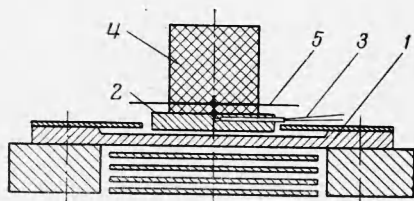
Здесь λ — подлежащий определению коэффициент теплопроводности, являющийся функцией температуры, c_p и γ — теплоемкость и удельный вес, которые считаются известными¹ функциями от T .

Таким образом, достаточно определить характер изменения температуры в одной точке образца, чтобы знать все поле температур $T = T(\xi)$.

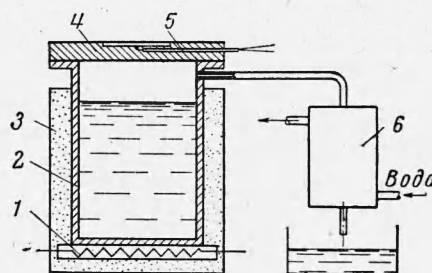
Интегрируя уравнение (1.1) от ξ до ∞ и учитывая, что $\partial T / \partial \xi \rightarrow 0$ при $\xi \rightarrow \infty$, получим

$$\lambda(\xi) = \frac{1}{2(dT/d\xi)} \int_{\xi}^{\infty} c_p \gamma \frac{dT}{d\xi} \xi d\xi \quad (1.2)$$

Из формулы (1.2) по экспериментально найденному полю определяется $\lambda(\xi)$, а следовательно, $\lambda = \lambda(T)$.

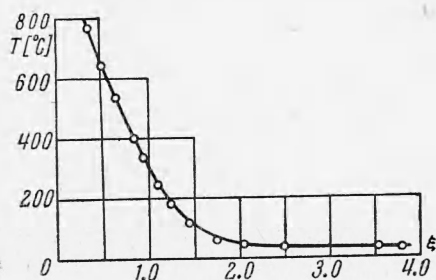


Фиг. 1

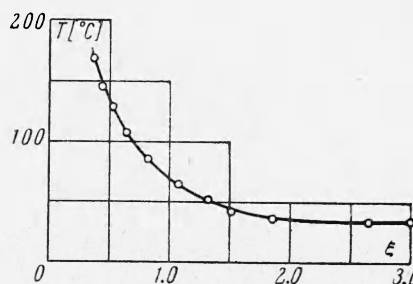


Фиг. 2

Использование автомобильного нагрева позволяет найти $\lambda(T)$ однократным дифференцированием экспериментально найденной зависимости $T(t)_{x=\text{const}}$. В противном случае произвольной зависимости температуры поверхности от времени определение $\lambda(T)$ было бы связано с эксперимен-



Фиг. 3



Фиг. 4

тальным нахождением зависимости $T(x)_{t=\text{const}}$ и ее дифференцированием по x , что приводит к большим ошибкам, поскольку эта зависимость может быть найдена лишь по дискретным значениям x .

Определение профилей $T(\xi)$ по расшифровке показаний нескольких дополнительных термопар, поставленных в различных сечениях, позволяет судить о погрешностях, вносимых ошибками измерительной аппаратуры и отклонениями температуры нагреваемой поверхности от постоянной. Следует заметить, что поддержание постоянства температуры поверхности испытуемого образца связано с определенными техническими трудностями, особенно при высоких температурах.

¹ Это обстоятельство налагает некоторые ограничения на применимость метода.

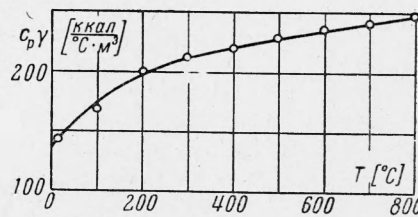
2. Экспериментальная реализация метода была осуществлена с помощью установки, схема которой представлена на фиг. 1.

Основными частями установки являются плоский графитовый нагреватель 1, регулированием мощности которого поддерживается (путем излучения) постоянство температуры буферной металлической пластины 2, контролируемое термопарой 3. Буферная пластина изолирована от находящегося под напряжением элементов установки.

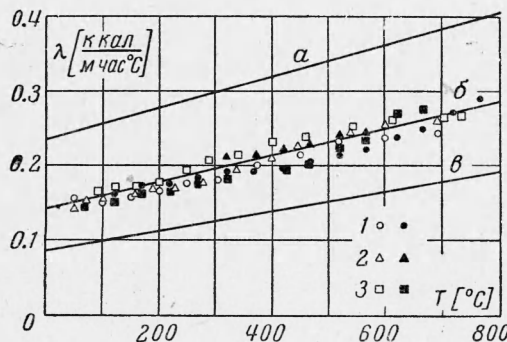
Регулирование мощности, потребляемой нагревателем, осуществлялось при помощи понижающего трансформатора, в первичную обмотку которого включен автотрансформатор. Испытуемый образец 4 состоял из двух притертых один к другому параллелепипедов с общим основанием 100×100 мм каждый, между которыми располагалась измерительная термопара 5 со спаем в центре основания.

Для уменьшения влияния непостоянства температуры поверхности образца в начальный период эксперимента ($\sim 5 \div 10$ сек), а также для снижения относительной погрешности определения координаты термопары (толщина термопары 0,5 мм) последняя располагалась на относительно большом расстоянии от нагреваемой поверхности (~ 10 мм). Суммарная высота образца составляла ~ 120 мм, что обеспечивало необходимое для применения метода условие полуограниченности.

Эксперимент начинается с установления стационарного режима буферной пластины ($1000 \pm 20^\circ \text{C}$) вместе с установленным на ее поверхности



Фиг. 5



Фиг. 6

вспомогательным образцом. Затем вспомогательный образец заменялся испытуемым и одновременно включались измерительные приборы. Запись показаний термопар (использовались хромельалюмелевые термопары) производилась на электронных потенциометрах ЭПП-09.

Как следует из формулы (1.2), определение $\lambda(T)$ в области низких температур ($50 \div 200^\circ \text{C}$) при высоких значениях температуры нагревателя может оказаться недо-

статочно точным из-за относительно большой погрешности определения $dT/d\xi$ в указанном интервале температур. С целью увеличения точности определения $\lambda(T)$ в диапазоне температур $50 \div 200^\circ \text{C}$ методом автоматических режимов была использована установка (фиг. 2), обеспечивающая высокую точность поддержания постоянной температуры поверхности за счет конденсации паров веретенного масла. Предварительно из масла выпарены низкокипящие фракции.

Масло заливалось в теплоизолированный кипятильник 2, 3, на днище которого смонтирован электрический нагреватель 1.

При исследовании теплопроводности пористых материалов конденсация осуществляется на имеющем малое термическое сопротивление тонком

металлическом фланце 4 (аналог буферной пластины) с зачеканенной на поверхности термопарой 5. При исследовании теплопроводности непрозрачных материалов конденсация производится непосредственно на поверхности образца. Конденсация избыточных паров масла осуществляется в конденсаторе 6.

3. На фиг. 3 и 4 представлены зависимости $T = T(\xi)$, полученные в экспериментах при температурах нагреваемой поверхности образца ~ 1000 и $\sim 200^\circ\text{C}$. Зависимости истинной теплоемкости c_p и удельного веса γ от температуры получены расчетным путем по известным химическому составу и коэффициенту линейного расширения материала.

Приводим результаты химического анализа исследуемого пеношамота:

Компонента	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	FeO
Содержание %	62.60	32.00	4.00	0.06	100

Зависимости $c_p = c_p(T)$ для компонент исследуемого материала заимствованы из работы [8], зависимость коэффициента линейного расширения $\alpha = \alpha(T)$ была получена авторами экспериментально. График изменения $c_p\gamma$ с температурой представлен на фиг. 5.

Полученная в результате обработки опытных данных зависимость $\lambda = \lambda(T)$ представлена на фиг. 6, где 1, 2 и 3 соответствуют различным экспериментам, причем светлые точки относятся к методу автомоделных режимов, черные — к методу Краева.

Кривые a и b на фиг. 6 построены по уравнениям

$$\lambda = 0.24 + 0.0002 T, \quad \lambda = 0.09 + 0.000125 T \quad [\text{ккал/м час } ^\circ\text{C}] \quad (3.1)$$

для удельного веса пеношамота $\gamma = 950 \text{ кг/м}^3$ и $\gamma = 600 \text{ кг/м}^3$, соответственно [8].

Полученная методом автомоделных режимов зависимость b для пеношамота с $\gamma = 820 \text{ кг/м}^3$ может быть аппроксимирована уравнением

$$\lambda = 0.14 + 0.000175 T \quad [\text{ккал/м час } ^\circ\text{C}] \quad (3.2)$$

Разброс опытных точек относительно осредняющей кривой не превышает $\pm 7\%$.

Значения λ при комнатной температуре, полученные из уравнений (3.1) и (3.2), хорошо согласуются с зависимостью $\lambda = \lambda(\gamma)$ для аналогичных материалов [8].

Представленные на фиг. 6 экспериментальные данные для пеношамота с удельным весом $\gamma = 820 \text{ кг/м}^3$, полученные авторами по методу О. А. Краева (черные точки), хорошо согласуются с результатами экспериментов, проведенных по методу автомоделных режимов.

Поступила 12 VI 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. Гостехиздат, 1954.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Гостехиздат, 1952.
3. Чудновский А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. Гостехиздат, 1954.
4. Краев О. А. Метод определения зависимости температуропроводности от температуры за один опыт. Теплоэнергетика, 1956, № 4.
5. Краев О. А. Определение температуропроводности теплоизоляционных материалов. Теплоэнергетика, 1958, № 4.
6. Демьянов Ю. А., Рахматулин Х. А., Румынский А. Н. Способ определения коэффициентов теплопроводности твердых тел, основанный на использовании автомоделных режимов. Бюллетень изобретений, 1960, № 8.
7. Boltzmann L. Ann. Physik., 1894, vol. 53, p. 959.
8. Теплофизические свойства веществ. Справочник под ред. Н. Б. Варгафтика. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956.