

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СУХОГО СЫПУЧЕГО ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

(Экспериментальная проверка)

А. С. ЛЯЛИКОВ

(Представлено проф. докт. техн. наук Г. И. Фуксом)

В работе [1] предложено соотношение для расчета коэффициента теплопроводности сухого сыпучего зернистого материала, имеющее вид

$$\lambda = \frac{6(1-m)\lambda_2}{k} \left[ \frac{1}{k} \ln \frac{1 + \frac{\delta_0}{r}}{1 + \frac{\delta_0}{r} - k} - 1 \right]. \quad (1)$$

В настоящей работе изложены результаты экспериментов, проведенных с целью проверки согласования расчетов по (1) с опытом.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  образцов зернистого материала определялся косвенным путем

$$\lambda = a c \gamma. \quad (2)$$

Коэффициент температуропроводности  $a$  и объемный вес  $\gamma$  находились из опыта, теплоемкость  $c$  одинакова в монолитном и дробленом состоянии вещества, принималась по литературным данным.

Для определения коэффициента  $a$  был сконструирован и изготовлен акалориметр одномерного теплового потока, представляющий из себя сосуд Дьюара с размещенными в нем термодарами по оси сосуда. Теоретическую основу прибора составляет решение задачи об охлаждении равномерно нагретого полуограниченного стержня в среде с постоянной температурой. Расчетами установлено, что в применявшемся акалориметре условия изолированности боковых поверхностей и бесконечной длины, составляющие теоретическую основу прибора, выполняются надежно, а погрешность определения коэффициента  $a$  не превышает 6,6%.

По общей схеме экспериментальной установки (рис. 1) можно представить ее элементы.

На рис. 1 цифрами обозначены: 1 — акалориметр одномерного теплового потока, 2 — термостат-холодильник, 3 — зеркальный гальванометр ГЭС-47, 4 — отсчетное приспособление гальванометра, 5 — магазин сопротивлений, 6 — лабораторный автотрансформатор, 7 — сушильный шкаф, 8 — секундомер или часы с секундной стрелкой.

Охлаждение акалориметра велось при малых градиентах температур. Диаметр зерен испытываемых материалов был менее 5,6 мм. Все это позволяет считать, что конвекция и лучеиспускание были настолько малы, что ими можно пренебречь.

Испытывались зернистые материалы в виде стальных, свинцовых, медных и алюминиевых шариков, так как шаровая форма зерна была принята при теоретическом расчете  $\lambda$ . Всего испытано 10 образцов, причем каждый образец испытывался 3 раза, реже 2 или 4 раза.

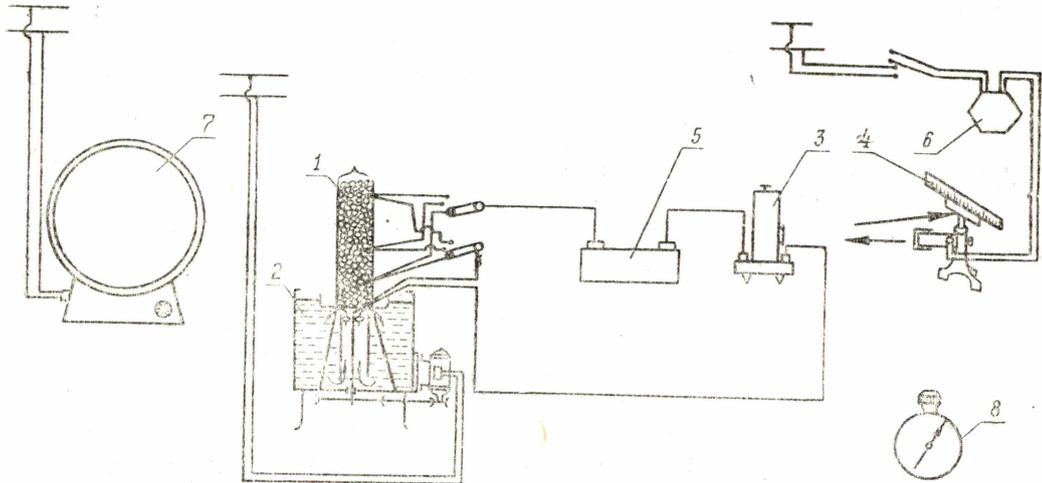


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Величины  $\lambda$  для материалов с шаровыми зернами, определенные по (2) на основе опытных значений  $a$  и  $\gamma$ , приведены в табл. 1. Здесь же даны значения  $\lambda$ , вычисленные по (1), и соотношения рас-

Таблица 1

№ обр.	Материал зерен	Средний размер зерен $d$ , мм	Насыпной вес $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Пористость $m$ , %	$\frac{\text{ккал}}{\text{м. час}^\circ\text{С}}$ опытн.	$\frac{\text{ккал}}{\text{м. час}^\circ\text{С}}$ расчетн.	$\frac{\lambda_{расч.}}{\lambda_{оп.}}$
1	Сталь подшипник. $\gamma_m = 7900$	5.60	4723	40.22	0.419	0.483	1.15
2	" "	3.10	4697	40.55	0.446	0.480	1.08
3	Свинец $\gamma_m = 11400$	4.27	6187	45.73	0.473	0.437	0.923
4	" "	3.77	6300	44.74	0.440	0.444	1.01
5	" "	3.10	6569	42.38	0.462	0.465	1.01
6	" "	1.67	6620	41.93	0.470	0.457	0.97
7	Алюминий $\gamma_m = 2670$	4.80	1615	39.15	0.484	0.602	1.25
8	" "	2.71	1571	41.01	0.420	0.577	1.37
9	" "	2—3	1575	41.01	0.417	0.577	1.38
10	Медь $\gamma_m = 8800$	4.70	5200	40.91	0.520	0.615	1.18

четных и опытных значений  $\frac{\lambda_{расч.}}{\lambda_{оп.}}$ . Значения теплоемкостей и коэффициентов теплопроводности материала зерен и воздуха приняты по данным М. А. Михеева [2]. Термическое сопротивление на поверхности раздела твердого тела и газа, учитываемое в (1) величиной  $\delta_0$ , для воздуха при атмосферном давлении найдено по формуле

$$\delta_0 = \frac{C}{p} \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Если по данным Смолуховского, Герке и Лазарева, в качестве среднего значения коэффициента  $C$  принять величину  $C = 1,65 \text{ м.ата}$ , то получим  $\delta_0 = 0,65 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$

Рассмотрение таблицы показывает:

а) Опытные величины  $\lambda$  для слоя зерен шаровой формы независимо от  $\lambda_m$  вещества зерен группируются в относительно узком интервале значений от  $\lambda = 0,417$  до  $\lambda = 0,520 \text{ ккал/м час}^\circ\text{С}$ .

б) Расчетные значения  $\lambda$  имеют тот же порядок, что и опытные.

в) Отношение  $\frac{\lambda_{расч.}}{\lambda_{оп.}}$ , характеризующее сходимость расчетов с экспериментом, составляет: для стали 1,08 — 1,15, для свинца — 0,923 — 1,01, алюминия — 1,25 — 1,38, меди — 1,18.

На рис. 2 дано графическое сопоставление расчетов по (1) с результатами поставленных опытов. Здесь же нанесены коэффициенты теплопроводности стали, свинца и кварца, полученные другими исследователями [3, 4, 5, 6].

Данные Смолуховского, помеченные на рис. 2 звездочкой.

Данные наших опытов и результаты экспериментов других исследователей, нанесенные на фиг. 2, показывают, что:

а) в опыте наблюдается тот же характер зависимости  $\lambda$  от  $d$ , что и в расчете по (1); имеющийся разброс точек объяснен некоторой неоднородностью состояния поверхностей зерен образцов наличием пленок окислов: и накатов, которые отмечены по фотографиям с увеличением;

б) наши опытные данные по теплопроводности стали и свинца совпадают с данными Клинга, методика опытов которого не вызывает сомнений, и имеют некоторое расхождение с результатами Шуманна и Фосса, методика которых недостаточно надежна;

в) в области малых размеров характерным является удовлетворительное согласование расчетов по (1) с опытами Смолуховского для порошкообразного железа.

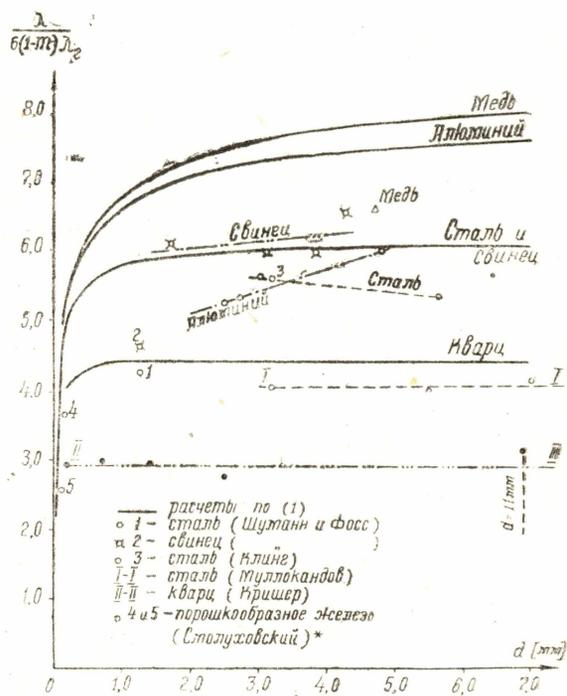


Рис. 2. Сопоставление расчетов по формуле (1) с данными опытов.

Таким образом, имеется основание заключить, что предлагаемый метод расчета позволяет достаточно надежно определять порядок величины теплопроводности зернистого материала с зернами округлой формы, и поэтому он может быть рекомендован для практических расчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляликов А. С. Расчет коэффициента теплопроводности сухого сыпучего зернистого материала [метод расчета], в настоящем сборнике.
2. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, М.-Л., 1949.
3. Schumann T. E. W. and Voss V., Heat Flow through granulated Material. Fuel in Science and Practice, Vol. XIII, № 8, 1934.
4. Kling G. Forschung auf Gebiete des Ingenieurwesens, Bd. 9, № 1, 1938.
5. Муллокандов Г. Н., Контактная теплопроводность слоя сферических частиц. Ж. Т. Ф., т. XVII, вып. 10, 1947.
6. Krischer O. Einfluss der Feuchtigkeit, Koernung und Temperature auf die Wärmeleitfähigkeit körnigen Körper. Beilage zum Gesundheits-Ingenieur, H. 33, R. 1, 1934.