

## Лабораторная работа №4

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА

#### 4.1. Цель работы

Изучение процесса теплопроводности и характеризующих его величин. Ознакомление с законами распространения теплоты посредством теплопроводности и методами определения основных параметров.

#### 4.2. Задачи работы

Выполнить расчет параметров процесса теплопроводности при переносе теплоты через стенку заданной конфигурации.

#### 4.3. Теоретические положения

**Теплопроводность** (кондуктивный теплообмен) – это процесс распространения теплоты за счет непосредственного соприкосновения тел (частиц тела) друг с другом. Она обусловлена движением микрочастиц (молекул) тела и возможна в твердых, жидких и газообразных средах.

**Температурным полем** называют совокупность значений температуры всех точек тела в данный момент времени. В общем случае уравнение температурного поля имеет вид:

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (4.1)$$

где  $t$  – температура тела;

$x, y, z$  – координаты точки;

$\tau$  – время.

Если температура зависит от времени, то температурное поле называют **нестационарным**. Если температура тела не изменяется с течением времени, то температурное поле называется **стационарным**.

**Изотермическая поверхность** – это геометрическое место точек с одинаковыми температурами. Изотермические поверхности между собой никогда не пересекаются, они либо замыкаются на себя, либо кончатся на границах тела.

**Тепловым потоком  $\Phi$**  называют количество теплоты переносимой через какую-либо поверхность в единицу времени.

Теплота самопроизвольно переносится только в сторону убывания температуры. Тепловой поток измеряют в Ваттах:  $W_t = \text{Дж/с}$ .

**Удельный тепловой поток** или **плотность теплового потока  $q$**  – это тепловой поток, отнесенный к единице поверхности ( $\text{м}^2$ ). Единица измерения теплового потока:

$$\text{Вт/м}^2 = \text{Дж}/(\text{с}\cdot\text{м}^2).$$

#### Закон Фурье

Основным законом теплопроводности является предложенная Ж. Фурье (1822 г.) и подтвержденная опытами гипотеза о пропорциональности удельного теплового потока градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(t) \quad (4.2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества.

Знак минус в уравнении (4.2) указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры, т.е. в направлении, противоположном температурному градиенту (рис. 4.1).

**Коэффициент теплопроводности** – это физическая величина, характеризующая способность тела проводить теплоту. Числовое значение  $\lambda$  определяет количество теплоты, проходящей в единицу времени через единицу поверхности тела при температурном градиенте, равном единице. Коэффициент теплопроводности имеет единицу измерения - Вт/(м·К).

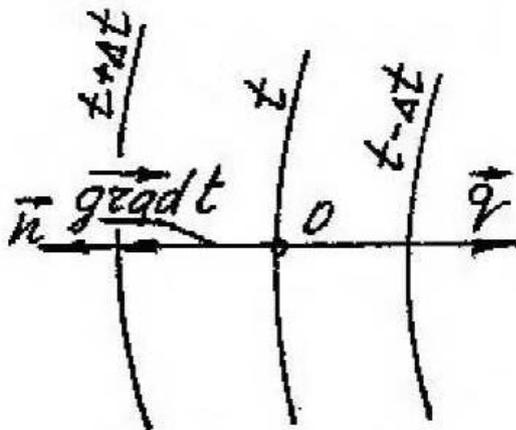


Рис. 4.1. К закону Фурье

Значения коэффициента  $\lambda$  для различных веществ определяются из справочных таблиц, составленных на основании экспериментальных данных. Коэффициент  $\lambda$  показывает, насколько хорошо проводит теплоту то или иное вещество.

Для большинства твердых тел зависимость  $\lambda$  от температуры близка к линейной:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot [1 + b \cdot (t - t_0)] \quad (4.3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности при температуре  $t$ , Вт/(м·К);

$\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности при температуре  $t_0$ , Вт/(м·К);

$b$  – константа, определяемая опытным путем.

Кроме температуры,  $\lambda$  зависит от химического состава, плотности, влажности и структуры материала.

### Теплопроводность в плоской многослойной стенке при стационарном режиме

Рассмотрим процесс теплопроводности через плоскую многослойную стенку, состоящую из трех однородных слоев (рис. 4.2), Коэффициент теплопроводности каждого слоя равен соответственно  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , а толщина слоев –  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ . Принимаем, что контакт между слоями идеальный и температура на соприкасающихся поверхностях двух слоев одинакова. Обозначим температуры поверхностей слоев  $t_{c1}, t_{c2}, t_{c3}, t_{c4}$ . При стационарном режиме удельный тепловой поток  $q$  постоянен и для всех слоев одинаков.

Для каждого слоя можно записать уравнение плотности теплового потока:

$$\begin{cases} q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{c1} - t_{c2}) \\ q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_{c2} - t_{c3}) \\ q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_{c3} - t_{c4}) \end{cases} \quad (4.4)$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – толщина слоев, м.

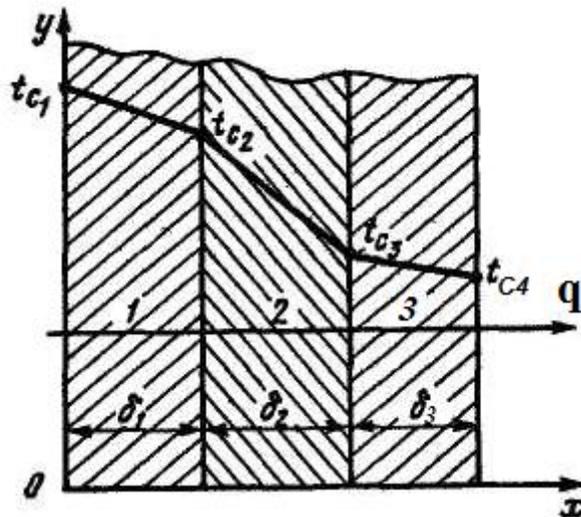


Рис. 4.2. Распределение температуры в многослойной стенке при  $q = const$

Преобразуя эту систему уравнений, получим уравнение плотности теплового потока для трехслойной плоской стенки:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c4}}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)}, \text{ Вм/м}^2 \quad (4.5)$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – толщина слоев, м.

Зная температуры на наружных поверхностях стенки  $t_{c1}$  и  $t_{c4}$  можно найти температуры между слоями:

$$\begin{cases} t_{c2} = t_{c1} - \frac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1} \\ t_{c3} = t_{c4} + \frac{q \cdot \delta_3}{\lambda_3} \end{cases} \quad (4.6)$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – толщина слоев, м.

#### 4.4. Порядок выполнения работы

1) Получить у преподавателя исходные данные: тип и размеры стенки (для плоской: ширину, высоту и толщину; для цилиндрической диаметры); материал слоев стенки; температуру внешних поверхностей стенки  $t_{c1}$  и  $t_{c4}$ .

2) Для заданных материалов слоев стенки определить коэффициенты теплопроводности слоев  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , используя приложения 1, 2 и 3.

3) Найти удельный тепловой поток для трехслойной плоской стенки по формуле (4.5).

4) Найти полный тепловой поток для трехслойной плоской стенки:

$$\Phi = q \cdot F, \text{ Вт} \quad (4.7)$$

где  $F = h \cdot b$  – площадь поверхности теплообмена.  $\text{м}^2$ .

5) Найти температуру поверхностей между слоями  $t_{c2}$  и  $t_{c3}$  по формуле (4.6).

#### 4.5. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, результаты вычислений и поясняющие рисунки.

#### 4.6. Контрольные вопросы

1. Что собой представляет процесс теплопроводности?
2. Что называют плотностью теплового потока?

3. Что такое градиент температуры?
4. Что такое температурное поле и изотермическая поверхность?
5. Что характеризует коэффициент теплопроводности?

#### Приложение 1

Плотность  $\rho$ , теплопроводность  $\lambda$ , теплоемкость  $C_p$  металлов и сплавов  
( $p = 0,1$  МПа,  $t = 20$  °С) [5]

Наименование элемента	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м·К	$C_p$ , кДж/(кг·К)
Алюминий	2700	29	0,896
Бронза (75% Cu, 25% Sn)	8660	25,9	0,344
Вольфрам	19340	169	0,134
Дюралюминий	2800	164	0,884
Железо	7880	74	0,44
Золото	19310	313	0,130
Калий	870	100	0,737
Кремний	2300	33,7	-
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	8520	110,7	0,385
Магний	1760	158	0,975
Медь	8930	390	0,388
Молибден	10214	136,9	0,251
Натрий	975	109	1,20
Никель	8900	67,5	0,427
Олово	7300	66,3	0,222
Платина	21460	69,8	0,132
Свинец	11350	35,1	0,127
Серебро	10500	419	0,234
Сталь 45	7794	32	0,560
Сталь углеродистая (C=0,5 %)	7830	53,6	0,465
Сталь нержавеющая 1X18Н9Т	7900	16	0,502
Титан	4540	15,1	0,531
Углерод, графит	1700-2300	174	0,67
Цинк	7150	113	0,384
Чугун (с=4%)	7270	51,9	0,419

#### Приложение 2

Плотность  $\rho$ , теплопроводность  $\lambda$ , теплоемкость  $C_p$  некоторых неметаллических материалов [4]

Наименование материала	$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м·К	$C_p$ , кДж/(кг·К)
Асбошифер	20	1800	0,64	-
Асфальт	30	2120	0,74	1,67
Бетон с щебнем	0	2000	1,28	0,84
Бетон сухой	0	1600	0,84	-
Бумага обыкновенная	20	-	0,14	1,51
Вата хлопчатобумажная	30	80	0,042	-

Плотность  $\rho$ , теплопроводность  $\lambda$  и предельная температура  $t$  применения теплоизоляционных и огнеупорных материалов и изделий [4]

Наименование материала или изделия	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м·К	$t$ , °С
Материалы			
Асбест	500	0,107+0,00019·t	700
Асбозонолит	520	0,143+0,00019·t	700
Асбозурит	700	0,162+0,000169·t	300
Асбослюда	600	0,120+0,000148·t	600
Асботермит	560	0,109+0,000145·t	550
Диатомит	450	0,091+0,00028·t	880
Зонолит	200	0,072+0,000262·t	1100
Минеральная стеклянная вата	200	0,047+0,87·t	500
Новоасбозурит	600	0,144+0,00014·t	250
Ньювель	450	0,87+0,00064·t	350
Совелит	500	0,09+0,00087·t	450
Ферригипс (паста феррои)	500	0,101+0,00015·t	600
Шлаковая вата (сорт 0)	200	0,06+0,000145·t	750
Изделия			
Асбоцементные сегменты	400	0,0919+0,000128·t	450
Вермикулитовые плиты	380	0,081+0,00015·t	700
Вулканитовые плиты	400	0,080+0,00021·t	600
Войлок строительный	300	0,05 при 0 °С	190
Кирпич диатомитовый	550	0,113+0,00023·t	850
Кирпич динасовый	1500	0,9+0,0007·t	1700
Кирпич керамический красный	1800	0,77 при 0 °С	–
Кирпич магнезитовый	2700	4,65-0,0017·t	1700
Кирпич пеношамотный	600	0,1+0,000145·t	1300
Кирпич пенидиатомитовый	230	0,07 при 70 °С	700
Кирпич хромитовый	3050	1,3+0,00041·t	1700
Кирпич шамотный	1850	0,84+0,0006·t	1400
Минеральный войлок	250	0,058 при 50 °С	–
Пенобетонные блоки	500	0,122 при 50 °С	300
Шлаковая и минеральная пробка	270	0,064 при 50 °С	150

Задание к лабораторной работе

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размеры плоской стенки										
Высота $h$ , м	1,5	0,5	1,2	0,6	0,3	0,45	0,8	0,95	1,1	0,7
Ширина $b$ , м	0,6	0,3	0,45	0,8	0,95	1,1	0,7	1,5	0,5	1,2
Толщины слоев плоской стенки										
$\delta_1$ , мм	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$\delta_2$ , мм	100	120	140	150	170	180	200	220	240	250
$\delta_3$ , мм	35	170	55	28	120	40	20	88	15	25
Температуры наружных поверхностей										
$t_{C1}$ , °C	1000	650	300	400	1400	580	830	350	420	700
$t_{C4}$ , °C	20	110	60	50	85	150	90	30	10	250
Материалы слоев стенки										
Слой 1	Чугун	Бронза	Железо	Сталь 45	Сталь углеродистая	Сталь нержавеющая	Медь	Латунь	Дюралюминий	Алюминий
Слой 2	Бетон с щебнем	Бетон сухой	Кирпич диатомитовый	Кирпич динасовый	Кирпич керамический красный	Кирпич магнитовый	Кирпич пеношамотный	Кирпич пенодиатомитовый	Кирпич хромитовый	Кирпич шамотный
Слой 3	Вата хлопчатобумажная	Мин. стекл. вата	Войлок строительный	Шлаковая вата	Асбест	Совелит	Минеральный войлок	Пенобетонные блоки	Вермикулитовые плиты	Вулканитовые плиты