

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Изучение процесса теплопередачи.
- 1.2. Освоение методики решения инженерных задач теплопередачи.
- 1.3. Знакомство с методами интенсификации теплопередачи.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2.1. Определение плотности теплового потока, передаваемого от одного теплоносителя к другому через разделяющую их плоскую стенку.
- 2.2. Расчетное исследование интенсификации теплопередачи.

3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В инженерной практике широкое распространение получили рекуперативные (поверхностные) теплообменные аппараты, в которых передача теплоты от одного теплоносителя к другому осуществляется через разделяющую их стенку. Этот вид теплообмена получил название теплопередачи. Теплопередача – это сложный процесс, включающий в себя теплоотдачу от более горячего теплоносителя к стенке, теплопроводность в стенке и теплоотдачу от стенки к более холодному теплоносителю.

При теплопередаче через плоскую стенку (рис. 3.1) плотность теплового потока q определяется:

$$q = K(t_{ж1} - t_{ж2}), \quad (3.1)$$

где $t_{ж1}$, $t_{ж2}$ – температуры соответственно горячего и холодного теплоносителей (принимаются неизменными, т.е. как среднеинтегральные по теплоотдающим поверхностям стенки); K – коэффициент теплопередачи, характеризующий интенсивность передачи теплоты от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку.

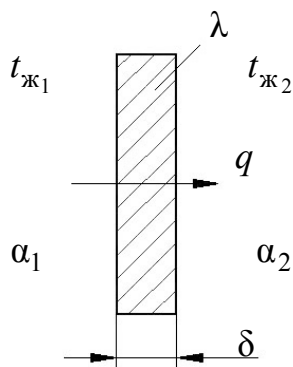


Рис. 3.1.

Величина коэффициента теплопередачи K для плоской стенки находится:

$$K = 1/(1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2), \quad (3.2)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие интенсивность теплообмена соответственно со стороны горячего и холодного теплоносителей; δ – толщина стенки; λ – коэффициент теплопроводности стенки, характеризующего способность ее вещества проводить теплоту.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется полным термическим сопротивлением теплопередачи R , которое равно сумме частных термических сопротивлений. Для плоской стенки оно определяется следующей формулой:

$$R = 1/K = 1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2, \quad (3.3)$$

где $1/\alpha_1, 1/\alpha_2$ – термические сопротивления теплоотдачи с обеих сторон стенки; δ/λ – термическое сопротивление теплопроводности стенки.

В технике нередко приходится решать задачу увеличения плотности теплового потока – интенсификацию теплопередачи. Как следует из уравнения (3.1), при неизменной разности температур между горячим и холодным теплоносителями, (что обычно определяется требованиями технологических процессов), для интенсификации теплопередачи необходимо увеличивать коэффициент теплопередачи K .

Увеличение K может быть достигнуто за счет уменьшения частных термических сопротивлений ($1/\alpha_1, 1/\alpha_2, \delta/\lambda$). В некоторых случаях сопротивления могут значительно, в сотни раз, отличаться друг от друга. При этих условиях коэффициент теплопередачи K в основном определяется наибольшим термическим сопротивлением и именно его надо уменьшать для увеличения K .

Если наибольшим сопротивлением является термическое сопротивление теплоотдачи ($1/\alpha_1$ или $1/\alpha_2$), то в целях интенсификации теплопередачи, кроме увеличения соответствующего коэффициента теплоотдачи (путем перехода от свободной конвекции к вынужденной, турбулизации вынужденного потока и т.д.), может быть применен другой метод – увеличение площади боковой поверхности стенки (путем оребрения) со стороны меньшего коэффициента теплоотдачи.

Если пренебречь термическим сопротивлением самих ребер (т.е. принять КПД ребра $\eta_p = 1$) и считать, что плотность теплового потока отнесена к гладкой поверхности стенки, то величину q можно определить:

$$q = K_p(t_{ж1} - t_{ж2}), \quad (3.4)$$

где K_p – коэффициент теплопередачи ребристой стенки.

В зависимости от оребряемой поверхности стенки величина K_p определяется по одной из следующих формул:

$$K_p = 1/[1/(m \cdot \alpha_1) + \delta/\lambda + 1/\alpha_2]; \quad (3.5)$$

$$K_p = 1/[1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/(m \cdot \alpha_2)], \quad (3.6)$$

где $m = F_{\text{ор}}/F_{\text{гл}}$ – коэффициент оребрения ($F_{\text{ор}}$, $F_{\text{гл}}$ – площади оребренной и гладкой поверхностей стенки); δ – толщина неоребренной стенки.

4. ЗАДАНИЕ

В теплообменном аппарате вертикальная плоская стенка толщиной δ , длиной l и высотой h выполнена из стали с коэффициентом теплопроводности λ_c (рис. 4.1). С одной стороны она омывается продольным вынужденным потоком горячей жидкости со скоростью w и температурой $t_{ж1}$ (вдали от стенки), с другой – свободным потоком атмосферного воздуха с температурой $t_{ж2}$.

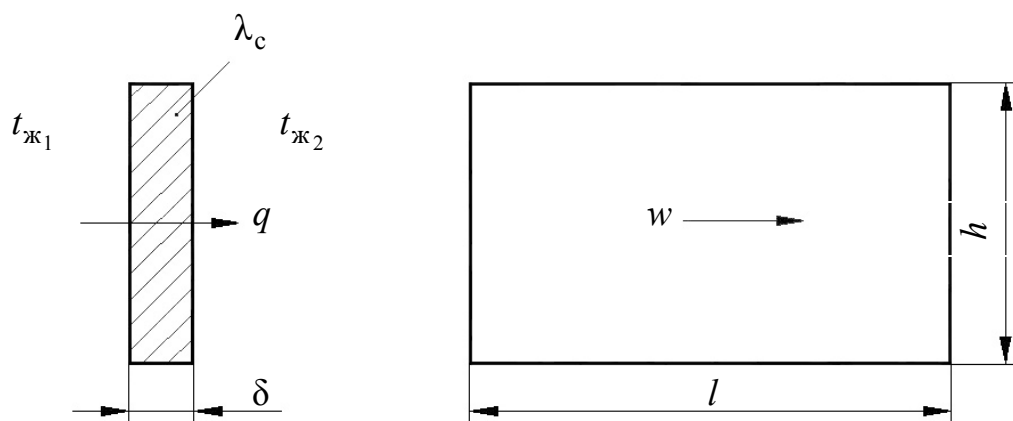


Рис. 4.1.

4.1. Определить плотность теплового потока q . Результаты расчетов занести в таблицу 4.1. Лучистым теплообменом пренебречь из-за малых значений $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$.

Таблица 4.1

α_1	α_2	$1/\alpha_1$	$1/\alpha_2$	δ/λ_c	R	K	q
Вт/(м ² · К)		(м ² · К)/Вт				Вт/(м ² · К)	Вт/м ²

4.2. Провести расчетное исследование вариантов интенсификации теплопередачи при неизменной разности температур между горячим и холодным теплоносителями.

4.2.1. Определить коэффициент теплопередачи при:

1) увеличении в 5, 10, 15 раз коэффициентов теплоотдачи α_1 ($K_{5\alpha_1}$, $K_{10\alpha_1}$, $K_{15\alpha_1}$) и α_2 ($K_{5\alpha_2}$, $K_{10\alpha_2}$, $K_{15\alpha_2}$);

2) увеличении в 5, 10, 15 раз площади F боковой поверхности стенки со стороны: а) горячей жидкости – F_1 (K_{p5F_1} , K_{p10F_1} , K_{p15F_1}); б) воздуха – F_2 (K_{p5F_2} , K_{p10F_2} , K_{p15F_2});

3) замене стальной стенки на латунную ($K_{\lambda_{\text{л}}}$), алюминиевую ($K_{\lambda_{\text{ал}}}$) и медную ($K_{\lambda_{\text{м}}}$) с коэффициентами теплопроводности соответственно $\lambda_{\text{л}} = 102 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_{\text{ал}} = 202 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_{\text{м}} = 393 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Внимание! Меняя в расчетах один из варьируемых факторов, все другие величины оставлять численно равными их первоначальным значениям (до интенсификации теплопередачи).

Результаты расчетов занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Вт/(м ² · К)							
$K_{5\alpha_1}$	$K_{10\alpha_1}$	$K_{15\alpha_1}$	$K_{5\alpha_2}$	$K_{10\alpha_2}$	$K_{15\alpha_2}$	K_{p5F_1}	K_{p10F_1}
Вт/(м ² · К)							
K_{p15F_1}	K_{p5F_2}	K_{p10F_2}	K_{p15F_2}	$K_{\lambda_{\text{л}}}$	$K_{\lambda_{\text{ал}}}$	$K_{\lambda_{\text{м}}}$	

4.2.2. Определить степень увеличения коэффициента теплопередачи σ_i при изменении каждого из варьируемых факторов по формуле:

$$\sigma_i = K_i / K, \quad (4.1)$$

где K , K_i – коэффициенты теплопередачи соответственно до и после интенсификации теплопередачи (величины K_i берутся из табл. 4.2.).

Результаты расчета занести в таблицу (табл. 4.3)

Таблица 4.3

$\sigma_{5\alpha_1}$	$\sigma_{10\alpha_1}$	$\sigma_{15\alpha_1}$	$\sigma_{5\alpha_2}$	$\sigma_{10\alpha_2}$	$\sigma_{15\alpha_2}$	σ_{5F_1}	σ_{10F_1}
σ_{15F_1}	σ_{5F_2}	σ_{10F_2}	σ_{15F_2}	$\sigma_{\lambda_{\text{л}}}$	$\sigma_{\lambda_{\text{ал}}}$	$\sigma_{\lambda_{\text{м}}}$	

4.2.3. Обозначив степень изменения варьируемых факторов через z , построить в масштабе (на одном рисунке) с использованием данных табл. 4.3 графики: $\sigma_{\alpha_1} = f_1(z)$, $\sigma_{\alpha_2} = f_2(z)$, $\sigma_{F_1} = f_3(z)$, $\sigma_{F_2} = f_4(z)$, $\sigma_{\lambda} = f_5(z)$ (для α и F $z = 1; 5; 10; 15$ и для λ $z = 1; \lambda_{\text{л}}/\lambda_{\text{с}}; \lambda_{\text{ал}}/\lambda_{\text{с}}; \lambda_{\text{м}}/\lambda_{\text{с}}$).

4.2.4. Проанализировать полученные результаты и сформулировать выводы о целесообразных путях интенсификации теплопередачи.

В выводах необходимо:

- 1) показать, какое из частных термических сопротивлений определяет величину полного термического сопротивления и коэффициента теплопередачи;
- 2) указать, какие из рассмотренных мероприятий практически не увеличивают теплопередачу, а какие являются эффективным средством ее интенсификации, дать этому объяснение;
- 3) сформулировать общее правило интенсификации теплопередачи.

5. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

5.1. Род горячей жидкости задается преподавателем (вода, трансформаторное масло, масло МС-20, масло МК). Все другие исходные данные для расчета выбираются из табл. 5.4 в соответствии с номером варианта работы.

5.2. Коэффициент теплоотдачи α не является физической постоянной того или иного вещества и поэтому его значения в справочных таблицах не приводятся, а определяются по следующей методике.

1) На основе анализа особенностей рассматриваемого процесса конвективного теплообмена выбирается конкретное уравнение подобия.

2) Используя выбранное уравнение подобия, определяется величина числа Нуссельта Nu .

3) С помощью найденного значения Nu вычисляется коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu(\lambda/l), \quad (5.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К); l – определяющий линейный размер, м (для пластины – это размер по направлению движения теплоносителя; здесь со стороны горячей жидкости – длина l , а со стороны воздуха – высота h).

Для расчета средних по длине пластины значений чисел \overline{Nu} в данной работе могут быть использованы следующие уравнения подобия.

При вынужденном обтекании плоской поверхности

$$\overline{Nu}_{жl} = C Re_{жl}^{n_1} Pr_{ж}^{n_2} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}, \quad (5.2)$$

где постоянные C , n_1 , n_2 являются функциями числа Re и определяются из табл. 5.1.

При свободном движении (естественной конвекции) вдоль вертикальных поверхностей (пластины, трубы)

$$\overline{Nu}_{жh} = C (Gr_{жh} \cdot Pr_{ж})^n (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}, \quad (5.3)$$

где постоянные C и n являются функциями $Gr \cdot Pr$ и определяются из табл. 5.2.

Таблица 5.1

$Re_{ж}$	C	n_1	n_2
$\leq 5 \cdot 10^5$	0,66	0,5	0,33
$> 5 \cdot 10^5$	0,037	0,8	0,43

Таблица 5.2

$Gr_{жч} \cdot Pr_{жс}$	C	n
$10^3 - 10^9$	0,75	0,25
$> 10^9$	0,15	0,33

Выражения и физический смысл чисел подобия, входящих в уравнения (5.2) и (5.3), приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Символ	Название	Математическое выражение	Физический смысл
Nu	Число Нуссельта	$\frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	Характеризует интенсивность теплоотдачи
Re	Число Рейнольдса	$\frac{w \cdot l}{\nu}$	Определяет режим вынужденного движения
Gr	Число Грасгофа	$\beta \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \Delta t$	Характеризует подъёмную силу, возникающую в жидкости вследствие разности плотностей, вызванной разностью температур
Pr	Число Прандтля	$\frac{\nu}{a}$	Характеризует физические свойства жидкости

Примечание. В математических выражениях для чисел подобия используются следующие обозначения:

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К);

λ – коэффициент теплопроводности жидкости¹, Вт/(м · К);

w – скорость потока жидкости, м/с;

ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с;

β – температурный коэффициент объёмного расширения жидкости, К⁻¹; для газов $\beta = 1/(t_{ж} + 273)$;

$g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;

$\Delta t = t_c - t_{ж}$ – разность температур стенки t_c и жидкости $t_{ж}$, °С;

¹ В теории теплообмена под термином «жидкость» подразумевают тела, находящиеся не только в капельно-жидком, но и в газообразном состоянии.

l – определяющий линейный размер, м;

a – коэффициент температуропроводности жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Безразмерный комплекс $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ уравнения (5.3) является числом подобия, характеризующим режим свободного движения. Число $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ часто называют числом Рэлея и обозначают $\text{Gr} \cdot \text{Pr} = \text{Ra}$.

Входящее в уравнения (5.2) и (5.3) отношение $(\text{Pr}_\text{ж}/\text{Pr}_\text{с})^{0.25}$ учитывает влияние направления теплового потока на величину коэффициента теплоотдачи для капельных жидкостей (для газов $\text{Pr}_\text{ж}/\text{Pr}_\text{с} = 1$).

5.3 Физические свойства теплоносителей (λ , ν , Pr) приведены в таблицах 5.5 – 5.9 и берутся из них по температуре жидкости $t_\text{ж}$, на что указывает индекс “ж” при числах подобия. Исключение составляет число $\text{Pr}_\text{с}$, выбираемое по температуре стенки $t_\text{с}$.

Внимание! В таблицах 5.5 – 5.9 величины теплопроводности λ и кинематической вязкости ν для удобства записи увеличены соответственно в 10^2 и 10^6 раз, т.е. действительные значения λ в 10^2 , а ν в 10^6 раз меньше приведенных в таблицах. Например, в табл. 5.5 для воды при $t = 50^\circ\text{C}$ указаны величины: $\lambda \cdot 10^2 = 64,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и $\nu \cdot 10^6 = 0,556 \text{ м}^2/\text{с}$; это значит, что действительное значение $\lambda = 64,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а $\nu = 0,556 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Расчет провести при допущении, что атмосферный воздух сухой, а давление воды и воздуха равно 760 мм рт.ст.

5.4. При определении коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 обычно задаются температурами поверхностей стенки со стороны охлаждаемой $t_{\text{с}1}$ и нагреваемой $t_{\text{с}2}$ сред (для металлических тонких стенок часто в первом приближении принимают $t_{\text{с}1} = t_{\text{с}2} = t_\text{с}$). При их выборе следует иметь в виду, что температура стенки всегда ближе к температуре той среды, со стороны которой α выше (обычно при вынужденном движении величина α значительно больше, чем при свободном).

После вычисления q необходимо проверить правильность принятых для расчета температур $t_{\text{с}1}$ и $t_{\text{с}2}$ по формулам:

$$t_{\text{с}1} = t_{\text{ж}1} - q/\alpha_1; \quad (5.4)$$

$$t_{\text{с}2} = t_{\text{ж}2} + q/\alpha_2 \quad (5.5)$$

и сравнить с принятыми значениями. Если отличие превышает 10 %, то следует, используя полученный результат, задаться новыми значениями температур поверхностей стенки и снова провести расчет.

Таблица 5.4

Исходные данные для расчета

№ вари- анта	w , м/с	$t_{ж1}$, °C	$t_{ж2}$, °C	l , м	h , м	δ , мм	λ_c , Вт/(м·К)
1	0,300	50	-20	1,00	0,50	2,0	30
2	0,325	60	-10	1,05	0,55	2,5	35
3	0,350	70	0	1,10	0,60	3,0	40
4	0,375	80	10	1,15	0,65	3,5	45
5	0,400	90	20	1,20	0,70	4,0	50
6	0,425	100	30	1,25	0,75	4,5	30
7	0,450	50	-20	1,30	0,80	5,0	35
8	0,475	60	-10	1,35	0,85	5,5	40
9	0,500	70	0	1,40	0,90	6,0	45
10	0,525	80	10	1,45	0,95	5,5	50
11	0,550	90	20	1,50	1,00	5,0	45
12	0,575	100	30	1,55	1,05	4,5	40
13	0,600	50	-20	1,60	1,10	4,0	35
14	0,625	60	-10	1,65	1,15	3,5	30
15	0,650	70	0	1,70	1,20	3,0	40
16	0,330	80	10	0,80	0,40	2,5	35
17	0,360	90	20	0,85	0,45	2,0	45
18	0,390	100	30	0,90	0,50	2,5	50
19	0,420	50	-20	0,95	0,55	3,0	30
20	0,450	60	-10	1,00	0,60	3,5	35
21	0,480	70	0	1,05	0,65	4,0	40
22	0,510	80	10	1,10	0,70	4,5	45
23	0,540	90	20	1,15	0,75	5,0	50
24	0,570	100	30	1,20	0,80	5,5	30
25	0,600	50	-20	1,25	0,85	6,0	35
26	0,630	60	-10	1,30	0,90	5,5	40
27	0,660	70	0	1,35	0,95	5,0	45
28	0,690	80	10	1,40	1,00	4,5	50
29	0,720	90	20	1,45	1,05	4,0	45
30	0,750	100	30	1,50	1,10	3,5	40

Таблица 5.5

Физические параметры воды на
линии насыщения при давлении
101325 Па (760 мм рт.ст.)

t, °C	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
30	61,8	0,805	5,42
40	63,5	0,659	4,31
50	64,8	0,556	3,54
60	65,9	0,478	2,98
70	66,8	0,415	2,55
80	67,4	0,365	2,21
90	68,0	0,326	1,95
100	68,4	0,295	1,75

Таблица 5.6

Физические параметры
трансформаторного масла

t, °C	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
30	10,98	14,7	202
40	10,90	10,3	146
50	10,82	7,58	111
60	10,72	5,78	87,8
70	10,64	4,54	71,3
80	10,56	3,66	59,3
90	10,47	3,03	50,5
100	10,38	2,56	43,9

Таблица 5.7

Физические параметры масла МС-20

t, °C	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
30	13,2	526	7310
40	13,1	276	3890
50	13,0	153	2180
60	12,9	91,9	1340
70	12,8	58,4	865
80	12,7	39,2	588
90	12,6	27,5	420
100	12,5	20,3	315

Таблица 5.8

Физические параметры масла МК

t, °C	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
30	14,61	691,2	7450
40	14,37	342,0	3810
50	14,13	186,2	2140
60	13,89	110,6	1320
70	13,63	69,3	858
80	13,40	46,6	591
90	13,14	32,3	424
100	12,90	24,0	327

Таблица 5.9

Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па (760 мм рт.ст.)

t, °C	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-20	2,28	12,79	0,716
-10	2,36	12,43	0,712
0	2,44	13,28	0,707
10	2,51	14,16	0,705
20	2,59	15,06	0,703
30	2,67	16,00	0,701