

## Лабораторная работа

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА

#### 10.1. Цель работы

Изучение процесса теплоотдачи и характеризующих его величин. Ознакомление с законами распространения теплоты посредством теплоотдачи и методами определения основных параметров при переносе теплоты от жидкости к различным типам поверхностей.

#### 10.2. Задачи работы

Выполнить расчет параметров процесса теплоотдачи при переносе теплоты от жидкости к поверхности заданной конфигурации.

#### 10.3. Теоретические положения

Передача теплоты конвекцией осуществляется перемещением в пространстве неравномерно нагретых объемов газа, пара и капельной жидкости. В общем случае в теории конвективного теплообмена любая среда называется одним наименованием - жидкость.

Конвективным называется теплообмен, обусловленный совместным действием конвекции и теплопроводности.

Теплоотдачей называется конвективный теплообмен, происходящий:

- между теплоносителем и омываемой поверхностью (твердым телом, стенкой);
- между теплоносителем и жидкостью, газом.

Тепловой поток  $\Phi$ , передаваемый конвекцией, определяется по закону Ньютона-Рихмана:

$$\Phi = q \cdot F = \alpha \cdot (t_C - t_J) \cdot A, \text{ Вт/м}^2 \quad (10.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_C$  и  $t_J$  – соответственно температура поверхности (стенки) и жидкости, °С или К;

$F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Главная трудность расчета по уравнению (10.1) заключается в определении *коэффициента теплоотдачи*  $\alpha$ , зависящего от целого ряда факторов: физических свойств омывающей поверхность жидкости (плотности, вязкости, теплоемкости, теплопроводности, природы возникновения и скорости движения среды, формы и размеров поверхности).

Коэффициент  $\alpha$  – величина сложная и ее невозможно определить теоретическим путем. Это связано со значительным влиянием на конвективный теплообмен (*теплоотдачу*) движения жидкости, которое подразделяется на *свободное* и *вынужденное*. Свободное движение среды происходит вследствие разности плотностей нагретых и холодных объемов жидкости, находящейся в гравитационном поле.

Свободное движение называют также *естественной конвекцией*, оно зависит от рода жидкости, разности температур и объема пространства, в котором происходит процесс.

Вынужденное движение среды возникает под действием *посторонних побудителей* (насоса, вентилятора, разности давлений и т.п.). В общем случае наряду с вынужденным движением одновременно может развиваться и свободное. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Движение жидкости может быть *ламинарным* или *турбулентным*. При ламинарном режиме частицы жидкости движутся послойно, не перемешиваясь. Турбулентный режим характеризуется непрерывным перемешиванием всех слоев жидкости. При любом режиме движения частицы жидкости, непосредственно прилегающие к поверхности омываемого тела, как

бы прилипают к ней. В результате вблизи обтекаемой поверхности вследствие действия сил вязкости образуется тонкий слой заторможенной жидкости, в пределах которого скорость изменяется от нуля (на поверхности тела) до скорости невозмущенного потока (вдали от тела). Этот слой заторможенной жидкости получил название *гидродинамического пограничного слоя*.

Интенсивность переноса теплоты зависит от режима движения жидкости в пограничном слое. При турбулентном пограничном слое перенос теплоты в направлении перпендикулярном движению жидкости обусловлен турбулентным ее перемешиванием. Однако непосредственно у поверхности тела, в ламинарном подслое, а также в ламинарном пограничном слое теплота в указанном направлении передается в основном теплопроводностью.

Поэтому определение коэффициента  $\alpha$  всегда базируется на экспериментальных данных. Однако результаты отдельных экспериментальных исследований должны быть обобщены с целью распространения на целую группу аналогичных или, как принято говорить, *подобных* явлений. Учение о подобных физических явлениях называется *теорией подобия*.

## Основы теории подобия

Теория подобия применяется в технике как теоретическая основа для *моделирования* технических устройств, а также как *средство обобщения* результатов физического и математического эксперимента. Последнее непосредственно связано с определением коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

При изучении конвективного теплообмена (теплоотдачи) чаще всего пользуются следующими критериями подобия:

1) Критерий Нуссельта  $Nu$ :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{ж}} \quad (10.3)$$

где  $l$  – характерный размер, м;

$\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности жидкости (см. приложение 7, 8, 9, 10), Вт/(м·К).

Критерий Нуссельта  $Nu$  характеризует интенсивность теплообмена в пограничном слое между жидкостью и поверхностью омываемого тела.

2) Критерий Рейнольдса  $Re$ :

$$Re_{ж} = \frac{W \cdot l}{\nu_{ж}} \quad (10.4)$$

где  $W$  – средняя скорость течения жидкости, м/с;

$\nu_{ж}$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости при данной температуре среды  $t_{ж}$  (см. приложение 7, 8, 9, 10), м<sup>2</sup>/с;

Критерий Рейнольдса  $Re$  представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости и определяет характер (режим) течения жидкости. Так, например, при  $Re < 2300$  движение жидкости является ламинарным, при  $Re > 10^4$  – режим турбулентный. Если  $2300 < Re < 10^4$ , имеет место переходный режим.

3) Критерий Прандтля  $Pr$ :

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda_{ж}} = \frac{\nu}{a} \quad (10.5)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Н·с/м<sup>2</sup>;

$a$  – коэффициент температуропроводности жидкости при данной температуре, м<sup>2</sup>/с;

$C_p$  – изобарная массовая теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К).

Критерий Прандтля  $Pr$  определяет физические свойства жидкости.

4) Критерий Грасгофа  $Gr$ :

$$Gr_{ж} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta_{ж} \cdot \Delta t}{\nu_{ж}} \quad (10.6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$

$\Delta t$  – разность температур поверхности (стенки) и жидкости, между которыми происходит теплообмен,  $^{\circ}\text{C}$  или  $\text{K}$ .

$\beta_{ж}$  – коэффициент объемного расширения жидкости,  $1/\text{K}$ .

Для жидких теплоносителей коэффициент  $\beta_{ж}$  выбирают из **приложений 8 и 10**.

Для газообразных теплоносителей коэффициент  $\beta_{ж}$  рассчитывают по формуле:

$$\beta_{ж} = \frac{1}{T_{ж}}, \quad 1/\text{K} \quad (10.7)$$

где  $T_{ж} = t_{ж} + 273, \text{K}$ .

Критерий Грасгофа  $Gr$  характеризует соотношение подъемных сил, возникающих в жидкости при нагреве, и сил вязкости.

Для процессов конвективного теплообмена критериальное уравнение представляют в виде:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{ж}} = f(Re, Gr, Pr) \quad (10.8)$$

### Теплоотдача при обтекании плоской поверхности (пластины)

Когда температура поверхности пластины  $t_C$  и температура набегающего потока  $t_{ж}$  различны, между поверхностью и потоком жидкости происходит процесс теплообмена. Согласно закону Ньютона-Рихмана тепловой поток пропорционален величине температурного напора  $\Delta t = (t_C - t_{ж})$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  зависит от гидродинамической картины и режима течения жидкости, расстояния от передней кромки пластины и теплофизических свойств среды.

В результате обобщения многочисленных опытных данных по теплоотдаче при продольном обтекании пластины различными жидкостями были получены следующие критериальные уравнения:

1) При ламинарном режиме течения в пограничном слое ( $Re < 4 \cdot 10^4$ ) для определения местного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu_{x_{ж}} = 0,33 \cdot Re_{x_{ж}}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_C} \right)^{0,25} \quad (10.9)$$

Критерии Прандтля и Рейнольдса определяют по следующим соотношениям:

$$Pr_{ж} = \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}} \quad Pr_C = \frac{\nu_C}{a_C} \quad (10.10)$$

$$Re_{x_{ж}} = \frac{W_0 \cdot x}{\nu_{ж}} \quad Re_{l_{ж}} = \frac{W_0 \cdot l}{\nu_{ж}} \quad (10.11)$$

где:  $l$  – длина пластины,  $\text{м}$ ;

$W_0$  – скорость потока, набегающего на пластину,  $\text{м/с}$ .

$\nu_{ж}$  и  $\nu_C$  – кинематический коэффициент вязкости соответственно при температуре жидкости  $t_{ж}$  и поверхности (стенки)  $t_C$  (см. приложение 7, 8, 9, 10),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$a_{ж}$  и  $a_C$  – коэффициент температуропроводности жидкости соответственно при температуре жидкости  $t_{ж}$  и поверхности (стенки)  $t_C$  (см. приложение 7, 8, 9, 10),  $\text{м}^2/\text{с}$

2) При ламинарном режиме течения для определения среднего по длине пластины коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu_{l_{ж}} = 0,66 \cdot Re_{l_{ж}}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_C} \right)^{0,25} \quad (10.12)$$

3) При турбулентном режиме течения в пограничном слое ( $Re > 4 \cdot 10^4$ ) для определения местного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu_{x,ж} = 0,03 \cdot Re_{x,ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_C} \right)^{0,25} \quad (10.13)$$

4) При турбулентном режиме течения для определения среднего по длине пластины коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu_{l,ж} = 0,037 \cdot Re_{l,ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_C} \right)^{0,25} \quad (10.14)$$

5) Для воздуха критерий Прандтля равен  $Pr = 0,71$  и мало изменяется с изменением температуры. Поэтому в случае обтекания пластины воздухом или двухатомным газом определение критерия Нуссельта для среднего коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  упрощается:

а) при ламинарном движении в пограничном слое ( $Re < 4 \cdot 10^4$ ):

$$Nu_{l,ж} = 0,57 \cdot Re_{l,ж}^{0,5} \quad (10.15)$$

б) при турбулентном режиме течения в пограничном слое ( $Re > 4 \cdot 10^4$ ):

$$Nu_{l,ж} = 0,032 \cdot Re_{l,ж}^{0,8} \quad (10.16)$$

Местный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_x$  определяется из соотношения:

$$Nu_{x,ж} = \frac{\alpha_x \cdot x}{\lambda_{ж}} \quad (10.17)$$

где  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности жидкости (см. приложение 7, 8, 9, 10), Вт/(м·К).

Средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяется из соотношения:

$$Nu_{l,ж} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{ж}} \quad (10.18)$$

### Теплоотдача при движении жидкости в трубах

Характер движения жидкости в трубах может быть ламинарным и турбулентным. О режиме течения судят по величине критерия Рейнольдса:

$$Re_{ж} = \frac{W \cdot d}{\nu_{ж}} \quad (10.19)$$

где  $W$  – средняя скорость течения жидкости, м/с;

$d$  – внутренний диаметр трубы, м;

$\nu_{ж}$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости при заданной температуре среды  $t_{ж}$ , м<sup>2</sup>/с (см. приложение 7, 8, 9, 10).

Если  $Re < 2000$ , то движение жидкости ламинарное. При  $Re = 2 \cdot 10^3 \dots 10^4$  режим течения называют переходным, а при  $Re > 10^4$  в трубе устанавливается развитое турбулентное движение жидкости.

Теория и опыты показывают, что теплоотдача при течении жидкости в трубе неодинакова по длине. У входа в трубу коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  имеет максимальное значение, а затем убывает на "участке тепловой стабилизации" длиной  $l_{СТ}$ . За пределами этого участка ( $l/d > 50$ ) коэффициент  $\alpha$  не изменяется.

При ламинарном течении жидкости встречаются два режима неизотермического движения: вязкостный и вязкостно-гравитационный.

Вязкостный режим соответствует течению вязких жидкостей при отсутствии естественной конвекции. При этом режиме передача теплоты между стенками канала и жидкостью осуществляется только теплопроводностью.

Вязкостно-гравитационный режим имеет место тогда, когда вынужденное движение жидкости сопровождается естественной конвекцией. При этом режиме теплота передается не только теплопроводностью, но и конвекцией.

При вязкостном режиме для определения среднего коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  М.А. Михеев рекомендует критерий Нуссельта находить по формуле:

$$Nu_{жcd} = 0,15 \cdot Re_{жcd}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_C} \right)^{0,25} \quad (10.20)$$

При  $Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$  имеет место вязкостно-гравитационный режим.

При этом параметры жидкости выбираются по условию

$t = 0,5 \cdot (t_0 + t_C)$ , где  $t_0$  – температура жидкости при входе в трубу.

При вязкостно-гравитационном режиме для приближенных расчетов среднего коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  критерий Нуссельта рекомендуется находить по формуле:

$$Nu_{жcd} = 0,15 \cdot Re_{жcd}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot Gr_{жcd}^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_C} \right)^{0,25} \quad (10.21)$$

где  $Gr_{жcd}$  – критерий Грасгофа:

$$Gr_{жcd} = \frac{g \cdot d^3}{\nu_{жс}^2} \beta_{жс} \cdot \Delta t \quad (10.22)$$

где  $\beta_{жс}$  – коэффициент объемного расширения жидкости при температуре жидкости  $t_{жс}$ , 1/К.

Для жидких теплоносителей коэффициент  $\beta_{жс}$  выбирают из **приложений 8 и 10**.

Для газообразных теплоносителей коэффициент  $\beta_{жс}$  рассчитывают по формуле (10.7)

Для воздуха уравнение упрощается и имеет вид:

$$Nu_{жcd} = 0,13 \cdot Re_{жcd}^{0,33} \cdot Gr_{жcd}^{0,1} \quad (10.23)$$

Если трубы имеют длину  $l < 50d$ , то значение  $\alpha$ , определенное по уравнениям (10.19), (10.20) и (10.21), надо умножить на поправочный коэффициент  $\varepsilon_l$  (см. табл. 10.1 при  $Re = 2 \cdot 10^3$ ).

Таблица 10.1

Значение коэффициента  $\varepsilon_l$  при различных значениях  $Re_{жcd}$  в зависимости от  $l/d$ .

$Re_{жcd}$	Отношение длины трубы к ее диаметру $l/d$								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$2 \cdot 10^3$	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

При развитии *турбулентном* движении ( $Re > 10^4$ ) для определения среднего коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  критерий Нуссельта рекомендуется находить по формуле:

$$Nu_{жcd} = 0,021 \cdot Re_{жcd}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_C} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (10.24)$$

Для воздуха эта формула упрощается:

$$Nu_{жcd} = 0,018 \cdot Re_{жcd}^{0,8} \cdot \varepsilon_l \quad (10.25)$$

При *переходном* режиме критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu = 0,008 \cdot Re_{ж}^{0,9} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \quad (10.26)$$

В критериальных уравнениях (10.20) – (10.26) за определяющую температуру принята средняя температура потока, за определяющий размер – диаметр круглой трубы или эквивалентный диаметр трубы  $d_{ЭКВ}$  любой формы сечения:

$$d_{ЭКВ} = \frac{4S_K}{U_K} \quad (10.27)$$

где  $S_K$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>;  
 $U_K$  – полный периметр канала, м.

Критериальные уравнения (10.23) и (10.24) применимы в пределах:

$$Re_{жс} = 1 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^6 \quad \text{и} \quad Pr = 0,6 \dots 2500$$

Для труб, имеющих  $l/d < 50$  коэффициент  $\varepsilon_l > 1$  и выбирается по таблице 10.1. Если  $l/d \geq 50$  то  $\varepsilon_l = 1$ .

Коэффициент теплоотдачи определяется из соотношения:

$$Nu_{лжс} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{ж}} \quad (10.28)$$

При расчете изогнутых труб (змеевиков) коэффициент  $\alpha$ , определенный для прямой трубы, умножают на поправочный коэффициент:

$$\varepsilon_{3М} = 1 + 3,6 \cdot \frac{d}{D} \quad (10.29)$$

где  $d$  – диаметр трубы, м;  
 $D$  – диаметр спирали, м.

#### 10.4. Порядок выполнения работы

1) Получить у преподавателя исходные данные: условие протекания теплоотдачи (при обтекании плоской поверхности или при движении жидкости в трубах); тип движущегося теплоносителя; скорость движения жидкости; размеры плоской поверхности или трубы; температуры стенки  $t_C$  и теплоносителя (жидкости)  $t_{ж}$ .

2) Определить характер движения среды, для этого нужно найти число Рейнольдса ( $Re_{ж}$ ) по формуле (10.4) или (10.9).

а) для плоской поверхности:

- ламинарный режим:  $Re < 4 \cdot 10^4$ ;
- турбулентный режим:  $Re > 4 \cdot 10^4$ .

б) для трубы:

- ламинарный режим:  $Re < 2000$ ;
- турбулентный режим:  $Re > 10^4$ ;
- переходный режим:  $2000 \leq Re \leq 4 \cdot 10^4$ .

3) Определить критерии Прандтля ( $Pr_{ж}$ ) и ( $Pr_C$ ) по формулам (10.10) и (10.11).

4) Определить критерий Грасгофа ( $Gr_{ж}$ ):

- а) для плоской поверхности по формуле (10.6);
- б) для трубы по формуле (10.22).

5) В зависимости от характера движения жидкости определить критерий Нуссельта ( $Nu$ ):

а) для плоской поверхности:

- при ламинарном режиме по формуле (10.12);
- при турбулентном режиме по формуле (10.14);

б) для трубы:

- при ламинарном режиме предварительно необходимо найти произведение критериев Прандтля и Грагофа ( $Gr_{ж} \cdot Pr_{ж}$ ) и затем производим расчет:
- при ламинарном вязкостном режиме ( $Gr_{ж} \cdot Pr_{ж} < 8 \cdot 10^5$ ) по формуле (10.20);
- при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме ( $Gr_{ж} \cdot Pr_{ж} \geq 8 \cdot 10^5$ ) по формуле (10.21);
- при турбулентном режиме по формуле (10.24);
- при переходном режиме по формуле (10.26).

б) Определить коэффициент теплоотдачи:

а) для плоской поверхности по формуле (10.18);

б) для трубы по формуле (10.28).

7) Найти удельный тепловой поток по формуле (10.1).

#### 10.5. Оформление отчета

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

#### 10.6. Контрольные вопросы

- 1) Что называют теплоотдачей?
- 2) Что такое конвективный теплообмен?
- 3) Как осуществляется перенос теплоты при ламинарном и турбулентном режимах течения?
- 4) Что представляет собой температурный напор?