

### 16.1. КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В ТРУБАХ И КАНАЛАХ

В этом случае безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий (число) Нуссельта зависит от критерия Грасгофа (при ламинарном режиме течения), критериев Рейнольдса и Прандтля

$$\overline{Nu} = f(Gr, Re, Pr), \quad (16.1)$$

где  $Gr = \frac{gR_0^3}{\nu^2} \beta \Delta T$  – критерий Грасгофа;  $Re = \frac{w_0 R_0}{\nu}$  критерий Рейнольдса;  $Pr = \frac{\nu}{a}$  – критерий Прандтля.

Особенностью течения и теплообмена в трубах и каналах является наличие участков *гидродинамической* и *тепловой* стабилизации потока на входе в трубу или канал.

На входе в трубу или канал происходит перестройка профиля скорости флюида от скорости на стенке, равной нулю ( $w_{ст} = 0$ ), по условию прилипания, до скорости невозмущенного потока на входе в трубу из-за действия сил вязкого трения. Расстояние, на котором происходит перестройка профиля скорости, называют длиной начального участка гидродинамической стабилизации  $\ell_{HT}$ . После прохождения начального участка профиль скорости не изменяется. Форма профиля скорости при течении в трубах и каналах зависит от рода жидкости или газа размеров трубы, начального профиля скорости и степени турбулентности входного потока.

При ламинарном течении профиль скорости при течении флюида в прямой гладкой трубе подчиняется параболическому закону:

$$w(r) = w_0 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right], \quad (16.2)$$

где  $w_0$  – скорость на оси трубы;  $r_0$  – радиус трубы;  $r$  – координата, отсчитываемая от оси трубы.

При турбулентном режиме течения профиль скорости имеет вид усеченной параболы и в инженерных расчетах его аппроксимируют степенной зависимостью:

$$w(r) = w_0 \left( 1 - \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (16.3)$$

где  $n$  – показатель степени, величина которого в зависимости от критерия Рейнольдса определена экспериментально.

Аналогично, при разной температуре флюида и стенки трубы ( $T_f \neq T_w$ ) на начальном участке тепловой стабилизации потока длиной  $\ell_{HT}$  происходит

## Лекция 16

перестройка профиля температуры. При движении флюида за пределами начального участка тепловой стабилизации профиль температуры изменяется до полного уменьшения перепада температур вследствие теплообмена.

Влияние на теплоотдачу начальных участков гидродинамической и тепловой стабилизации в расчетах учитывают поправкой «на начальный участок», которую обозначают  $\varepsilon_\rho$  для локальных коэффициентов теплоотдачи и  $\bar{\varepsilon}_\rho$  для средних коэффициентов теплоотдачи.

### **16.1.1. Теплоотдача при движении флюида в прямых гладких трубах**

При движении жидкостей и газов в трубах и каналах существуют ламинарный ( $Re_{f,d} \leq 2300$ ), турбулентный ( $Re_{f,d} \geq 10^4$ ) и переходный от ламинарного к турбулентному ( $2300 < Re_{f,d} < 10^4$ ) режимы течения флюида.

*Определяющие параметры* для расчета критерия Рейнольдса при течении флюида в трубах и каналах:

а)  $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура флюида в трубе, где  $T_{f,вх}$  и  $T_{f,вых}$  – температура флюида на входе в трубу и выходе из трубы;

б)  $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;

в)  $w_0 = \frac{G}{\rho F}$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида, где  $G$  – массовый расход теплоносителя;  $\rho$  – плотность текучей среды;  $F$  – площадь поперечного сечения трубы или канала.

#### **А. Ламинарный режим течения флюида $Re \leq 2300$**

Теплоотдача в трубах при *стабилизированном течении* и *стабилизированном теплообмене* может быть рассчитана при постоянной температуре поверхности флюида ( $T_w = \text{const}$ ) и при постоянном тепловом потоке, поступающем на стенку трубы или уходящем от стенки ( $Q_w = \text{const}$ ) по приближенной формуле

$$\overline{Nu} = 4\varepsilon_t, \quad (16.4)$$

где температурную поправку  $\varepsilon_t$  рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (16.5)$$

*Определяющие параметры* в формуле (16.4):

а)  $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура флюида в трубе;

б)  $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;

в)  $w_0 = \frac{G}{\rho F}$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

## Лекция 16

При ламинарном режиме движения в прямых гладких трубах и *наличии участков гидродинамической и тепловой стабилизации* для более точной аппроксимации экспериментальных данных выделяют два подрежима течения: ламинарный *вязкостный* и ламинарный *вязкостно-гравитационный* режимы.

Ламинарный *вязкостный* режим течения существует при числах Рэлея  $Ra < 8 \cdot 10^5$ , а ламинарный *вязкостно-гравитационный* режим – при числах Рэлея  $Ra \geq 8 \cdot 10^5$ . При этом *определяющие параметры* для расчета критерия Рэлея находят по формулам:

а)  $T_0 = 0,5 \cdot (T_w + \bar{T}_f)$ , где ;  $\bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ ;

б)  $R_0 = d_{вн}$  - внутренний диаметр трубы.

### ***Теплоотдача при ламинарном вязкостном режиме движения текучей среды в трубах ( $Re \leq 2300$ ; $Ra < 8 \cdot 10^5$ )***

Средний по внутренней поверхности трубы длиной  $\ell$  коэффициент теплоотдачи рассчитывают по формуле Б.Г. Петухова, которая получена при  $\frac{\ell}{Re \cdot d} \leq 0,05$  и  $0,07 \leq \frac{\mu_w}{\mu_f} \leq 1500$ :

$$\bar{Nu} = 1,55 \cdot \left( \frac{Pe \cdot d_{вн}}{\ell} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14} \cdot \bar{\varepsilon}_\ell, \quad (16.6)$$

где  $Pe = \frac{w_0 R_0}{a}$  – критерий Пекле;  $\mu_f$  – динамический коэффициент вязкости флюида при определяющей температуре  $T_0$ ;  $\mu_w$  – динамический коэффициент вязкости флюида при температуре стенки  $T_w$

*Определяющие параметры* в формуле (16.6):

а)  $T_0 = 0,5 \cdot (T_w + \bar{T}_f)$ , где ;  $\bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ ;

б)  $R_0 = d_{вн}$  - внутренний диаметр трубы.

в)  $w_0 = \frac{G}{\rho F}$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Поправку на начальный участок гидродинамической стабилизации  $\varepsilon$  рассчитывают по формулам:

а) при  $\frac{\ell}{Re \cdot d} < 0,1$

$$\bar{\varepsilon}_\ell = 0,6 \cdot \left( \frac{\ell}{Re \cdot d} \right)^{-1/7} \cdot \left( 1 + 2,5 \cdot \frac{\ell}{Re \cdot d} \right); \quad (16.7)$$

а) при  $\frac{\ell}{Re \cdot d} \geq 0,1$

$$\bar{\varepsilon}_\ell \approx 1, \quad (16.8)$$

Лекция 16

где  $\ell$  – длина трубы.

Определяющие параметры в формулах (16.7) и (16.8):

- а)  $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура флюида в трубе;
- б)  $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы.
- в)  $w_0 = \frac{G}{\rho F}$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

**Теплоотдача при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме движения текучей среды в трубах ( $Re \leq 2300$ ;  $Ra \geq 8 \cdot 10^5$ )**

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме течения может быть рассчитан по критериальному уравнению М.А. Михеева

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,15 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Pr_f^{0,33} \cdot (Gr_{f,d} Pr_f)^{0,1} \cdot \varepsilon_t \bar{\varepsilon}_\ell. \quad (16.9)$$

Определяющие параметры в формуле (16.9):

- а)  $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура флюида в трубе;
- б)  $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы.
- в)  $w_0 = \frac{G}{\rho F}$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Температурную поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (16.10)$$

Поправочный коэффициент  $\bar{\varepsilon}_\ell$ , учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

- а) при  $\frac{\ell}{d} < 50$  значение  $\bar{\varepsilon}_\ell$  находят по данным табл. 16.1;
- б) при  $\frac{\ell}{d} \geq 50$   $\bar{\varepsilon}_\ell = 1$

Таблица 16.1

**Значение  $\bar{\varepsilon}_\ell$  при вязкостно-гравитационном режиме течения флюида**

$\frac{\ell}{d}$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\bar{\varepsilon}_\ell$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

**Б. Турбулентный режим течения флюида  $Re \geq 10^4$** 

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении флюида в прямых гладких трубах рассчитывают по формуле М. А. Михеева

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,021 \cdot Re_{f,d}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \varepsilon_t \overline{\varepsilon}_\ell. \quad (16.11)$$

Определяющие параметры в формуле (16.11):

- а)  $T_0 = \overline{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура флюида в трубе;
- б)  $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы.
- в)  $w_0 = \frac{G}{\rho F}$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Температурную поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (16.10).

Поправочный коэффициент  $\overline{\varepsilon}_\ell$ , учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

- а) при  $\frac{\ell}{d} < 50$   $\overline{\varepsilon}_\ell \approx 1 + \frac{2d}{\ell}$ ;
- б) при  $\frac{\ell}{d} \geq 50$   $\overline{\varepsilon}_\ell = 1$

Более точные значения поправки на начальный участок  $\overline{\varepsilon}_\ell$  в зависимости от критерия Рейнольдса приведены в табл. 16.2.

Таблица 16.2

Значение  $\overline{\varepsilon}_\ell$  при турбулентном режиме течения флюида

$Re \cdot 10^4$	$\ell/d$							
	1	2	5	10	15	20	30	40
1	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03
2	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02
5	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02
10	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02
100	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01

Анализ данных табл. 16.2 показывает, что с увеличением турбулентности потока (увеличением числа Рейнольдса) влияние начального участка гидродинамической стабилизации на теплоотдачу уменьшается.

**В. Переходный режим течения флюида  $2300 < Re < 10^4$** 

Переходный режим течения флюида характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений. В этом случае коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле

$$\overline{Nu}_{f,d} = K_0 \cdot Pr_{f,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \overline{\varepsilon}_\rho, \quad (16.12)$$

где комплекс  $K_0$  зависит от числа Рейнольдса (см. табл. 16.3), а поправку  $\overline{\varepsilon}_\rho$  рассчитывают так же, как и при турбулентном режиме течения флюида.

Таблица 16.3

Зависимость комплекса  $K_0$  от числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-3}$	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Температурную поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (16.10).

*Определяющие параметры* в формуле (16.12):

- а)  $T_0 = \overline{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура флюида в трубе;
- б)  $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы.
- в)  $w_0 = \frac{G}{\rho F}$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Переходный режим течения флюида в прямых гладких трубах также можно рассчитать следующим образом:

$$\overline{Nu} = \gamma \cdot \overline{Nu}_{турб} + (1 - \gamma) \cdot \overline{Nu}_{лам}, \quad (16.13)$$

где  $\overline{Nu}_{лам}$  и  $\overline{Nu}_{турб}$  – числа Нуссельта, рассчитанные по формулам (16.4) и (16.11) для стабилизированного ламинарного и турбулентного режимов течения соответственно;  $\gamma$  – коэффициент перемежаемости, равный:

$$\gamma = 1 - \exp\left(1 - \frac{Re}{2300}\right). \quad (16.14)$$

При числах Рейнольдса  $Re = 2300$  коэффициент перемежаемости  $\gamma = 0$  и число Нуссельта  $\overline{Nu} = \overline{Nu}_{лам}$ .

При числах Рейнольдса  $Re \geq 10000$  коэффициент перемежаемости  $\gamma \approx 1$  и число Нуссельта  $\overline{Nu} = \overline{Nu}_{турб}$ .

## Лекция 16

### **Теплоотдача при движении газов в трубах**

Для газов критерий Прандтля  $Pr_f \approx 0,7 \div 1,0$  и практически не зависит от температуры, поэтому температурная поправка  $\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25} \approx 1$ . С учетом этого формулы (16.18), (16.19) и (16.50) можно упростить и записать в виде

а) ламинарный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,146 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Gr_{f,d}^{0,1}; \quad (16.15)$$

б) турбулентный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,018 \cdot Re_{f,d}^{0,8}; \quad (16.16)$$

в) переходный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,86 \cdot K_0; \quad (16.17)$$

*Замечание.* При больших температурных напорах и турбулентном режиме течения газов коэффициенты теплоотдачи могут отличаться от значений, вычисленных по уравнениям (16.15), (16.16) и (16.17). В этом случае расчет необходимо проводить по формулам (16.9), (16.11) и (16.12), принимая в качестве температурной поправки выражение

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\overline{T}_f}{\overline{T}_w}\right)^m, \quad (16.18)$$

где  $\overline{T}_f$  – средняя температура газа в трубе, Кельвин;

$\overline{T}_w$  – средняя температура стенки трубы, Кельвин;

$m = 0,4$ , если  $\overline{T}_w > \overline{T}_f$  и  $m = 0$ , если  $\overline{T}_w < \overline{T}_f$ .

*Определяющие параметры* в формулах (16.15), (16.16) и (16.17):

а)  $T_0 = \overline{T}_f = 0,5(T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура газа в трубе;

б)  $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;

в)  $w_0 = \frac{G}{\rho F}$  – средняя по сечению трубы скорость течения флюида.

#### **16.1.2.2. Теплоотдача при движении флюида в каналах произвольного поперечного сечения**

Все вышеприведенные критериальные формулы для расчета теплоотдачи в круглой трубе применимы и для расчета коэффициента теплоотдачи при течении жидкостей и газов в каналах другой (не круглой) формы поперечного сечения (прямоугольной, треугольной, кольцевой и т.д.), при продольном омывании пучков труб, заключенных в канал произвольного поперечного сечения, а также при движении жидкости, не заполняющей

## Лекция 16

всего сечения канала. При этом в качестве определяющего (характерного) размера в расчетах следует применять эквивалентный (гидравлический) диаметр канала:

$$R_0 = d_{\text{экв}} = d_{\Gamma} = 4 \frac{F}{P}, \quad (16.19)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения потока флюида («живое» сечение канала),  $\text{м}^2$ ;  $P$  – смоченный периметр канала, м.

Рассмотрим пример расчета эквивалентного (гидравлического) диаметра каналов некруглой формы, изображенных на рис. 16.1. При частичном заполнении канала прямоугольной формы с размерами  $a \times b$  капельной жидкостью по высоте канала на  $a/4$  (см. рис. 16.1,а) эквивалентный диаметр равен:

$$R_0 = d_{\text{экв}} = 4 \frac{\frac{a}{4} \cdot b}{2 \frac{a}{4} + 2b}. \quad (16.20)$$

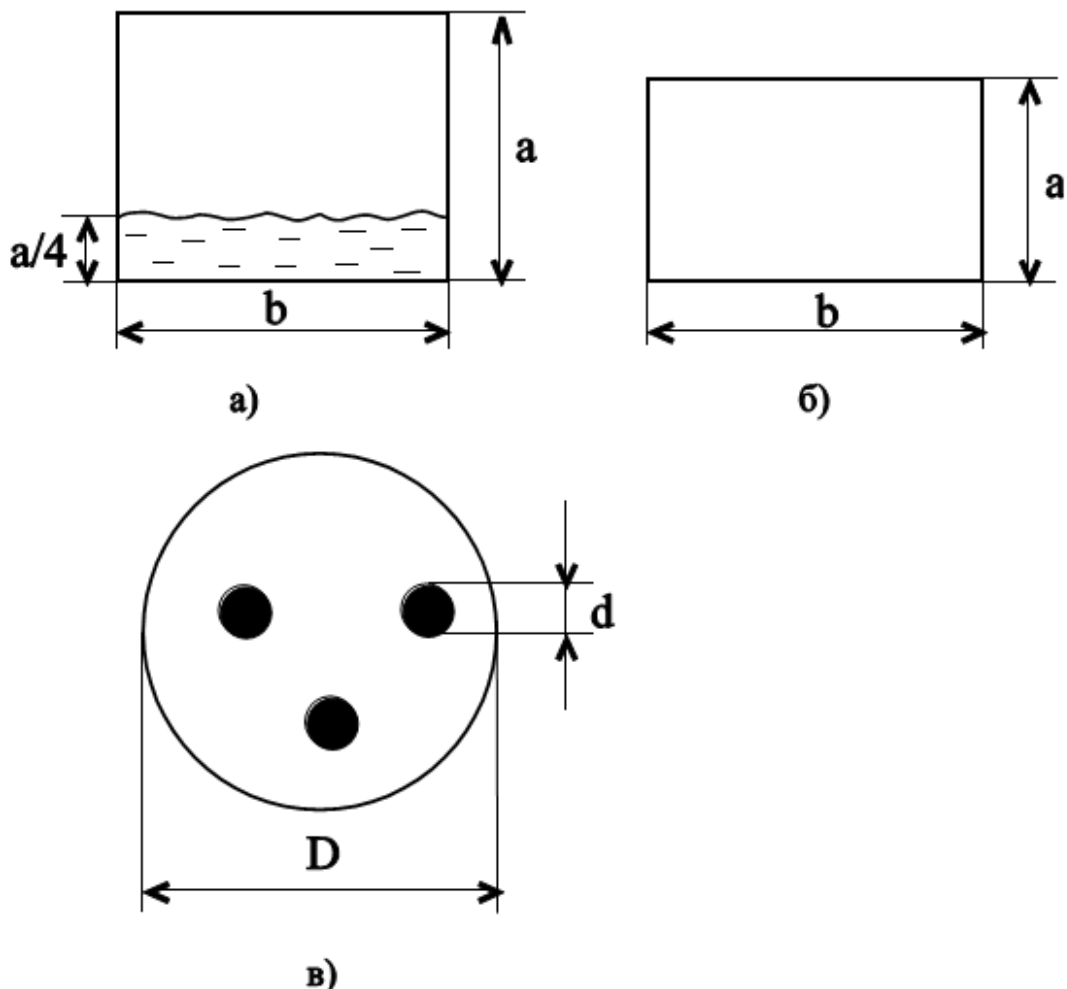


Рис. 16.1. Каналы различной формы



### 16.1.2.3. Теплоотдача при турбулентном движении флюида в изогнутых трубах

При движении флюида в изогнутых трубах (коленах, змеевиках) происходит дополнительная турбулизация потока и, как следствие, увеличение коэффициента теплоотдачи. При теплоотдаче в изогнутых трубах безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий Нуссельта рассчитывают по формуле (16.11) для турбулентного режима в прямых гладких трубах и умножают на поправочный коэффициент, учитывающий увеличение коэффициента теплоотдачи:

$$\varepsilon_{\Gamma} = 1 + 1,8 \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{R_{\Gamma}}, \quad (16.21)$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы;  $R_{\Gamma}$  – радиусгиба (изгиба) трубы.

### 16.1.3. КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ВНЕШНЕМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ

В этом случае безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий (число) Нуссельта зависит от критерия Рейнольдса и критерия Прандтля

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (16.22)$$

где  $Re = \frac{w_0 R_0}{\nu}$  – критерий Рейнольдса;  $Pr = \frac{\nu}{a}$  – критерий Прандтля.

#### 16.1.3.1. Продольное обтекание пластины и внешней поверхности трубы

Схема формирования гидродинамического пограничного слоя при обтекании плоской пластины с острой кромкой показана на рис. 16.2. Область пограничного слоя – область, в которой скорость потока изменяется от нуля на стенке до скорости невозмущенного потока  $w_0$  за пределами пограничного слоя.

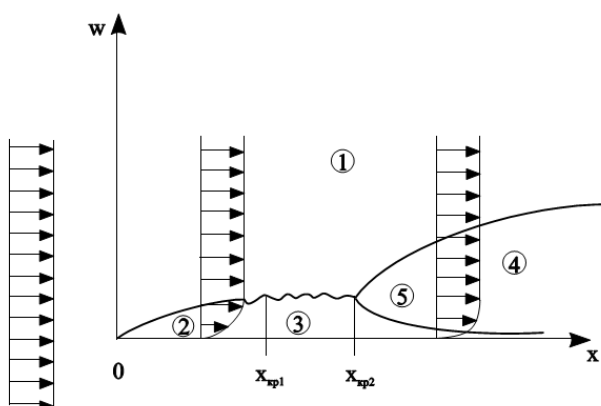


Рис. 16.2. Гидродинамический пограничный слой при продольном обтекании пластины:

1 – область невозмущенного потока; 2 – ламинарный пограничный слой; 3 – переходная область пограничного слоя; 4 – турбулентное ядро пограничного слоя; 5 – вязкий подслой турбулентного пограничного слоя

## Лекция 16

Экспериментально установлено, что ламинарный режим течения в пограничном слое существует при числах Рейнольдса  $Re < 10^4$ , турбулентный режим – при  $Re > 10^6$ , а переходный от ламинарного к турбулентному режим – при  $Re = 10^4 \div 10^6$ . Заметим, что численные значения критических чисел Рейнольдса  $Re_{кр1} = 10^4$  и  $Re_{кр2} = 10^6$  – весьма условные величины, поскольку зависят от структуры набегающего потока и состояния поверхности пластины. В инженерных расчетах конвективной теплоотдачи переходный режим течения не рассматривают и принимают допущение о том, что ламинарный режим течения сменяется турбулентным течением при критерии Рейнольдса  $Re_{кр} = 5 \cdot 10^5$ .

### ***А. Ламинарный режим течения флюида $Re < 5 \cdot 10^5$***

Местный (локальный) и средний по поверхности коэффициенты теплоотдачи при *ламинарном течении* флюида вдоль пластины или внешней поверхности трубы равны:

а) при  $T_w = \text{const}$

$$Nu_x = 0,332 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}; \quad (16.23)$$

$$\overline{Nu} = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}; \quad (16.24)$$

б) при  $Q_w = \text{const}$

$$Nu_x = 0,46 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}; \quad (16.25)$$

$$\overline{Nu} = 0,69 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}. \quad (16.26)$$

### ***Б. Турбулентный режим течения флюида $Re \geq 5 \cdot 10^5$***

Местный (локальный) и средний коэффициенты теплоотдачи при *турбулентном течении* флюида вдоль пластины или внешней поверхности трубы рассчитывают по формулам

$$Nu_x = 0,0296 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}; \quad (16.27)$$

$$\overline{Nu} = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}. \quad (16.28)$$

*Определяющие параметры* в формулах (16.23) – (16.28):

а)  $T_0 = T_f$  – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя);

## Лекция 16

- б)  $R_0 = x$  – продольная координата в формулах (16.23), (16.25) и (16.27);  
в)  $R_0 = \ell$  – длина пластины или трубы в формулах (16.24), (16.26) и (16.28);  
г)  $w_0$  – скорость невозмущенного потока (скорость за пределами гидродинамического пограничного слоя).

### ***Расчет толщины гидродинамического пограничного слоя***

Толщина гидродинамического пограничного слоя на расстоянии  $x$  от передней кромки пластины при течении жидкости или газа с постоянными физическими свойствами вдоль пластины или вдоль внешней поверхности трубы равна:

- а) при  $Re_x \leq 5 \cdot 10^5$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{4,64}{Re_x^{0,5}}; \quad (16.29)$$

- б) при  $Re_x > 5 \cdot 10^5$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,376}{Re_x^{0,2}}; \quad (16.30)$$

*Определяющие параметры* в формулах (16.29), (16.30):

- а)  $T_0 = T_f$  – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя);  
б)  $R_0 = x$  – продольная координата;  
в)  $w_0$  – скорость невозмущенного потока (скорость за пределами гидродинамического пограничного слоя).

### ***16.1.3.2. Теплоотдача при поперечном обтекании одиночной трубы***

Гидродинамика потока при поперечном обтекании одиночной трубы (цилиндра) в зависимости от критерия Рейнольдса показана на рис. 16.3. Критерий Рейнольдса в этом случае рассчитывают по формуле

$$Re = \frac{w_0 R_0}{\nu} = \frac{w_0 d_H}{\nu}, \quad (16.31)$$

где  $w_0$  – скорость набегающего потока;

$R_0 = d_H$  – определяющий размер, равный наружному диаметру трубы (цилиндра);

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости флюида при определяющей температуре  $T_0 = T_f$  за пределами теплового пограничного слоя (вдали от трубы).

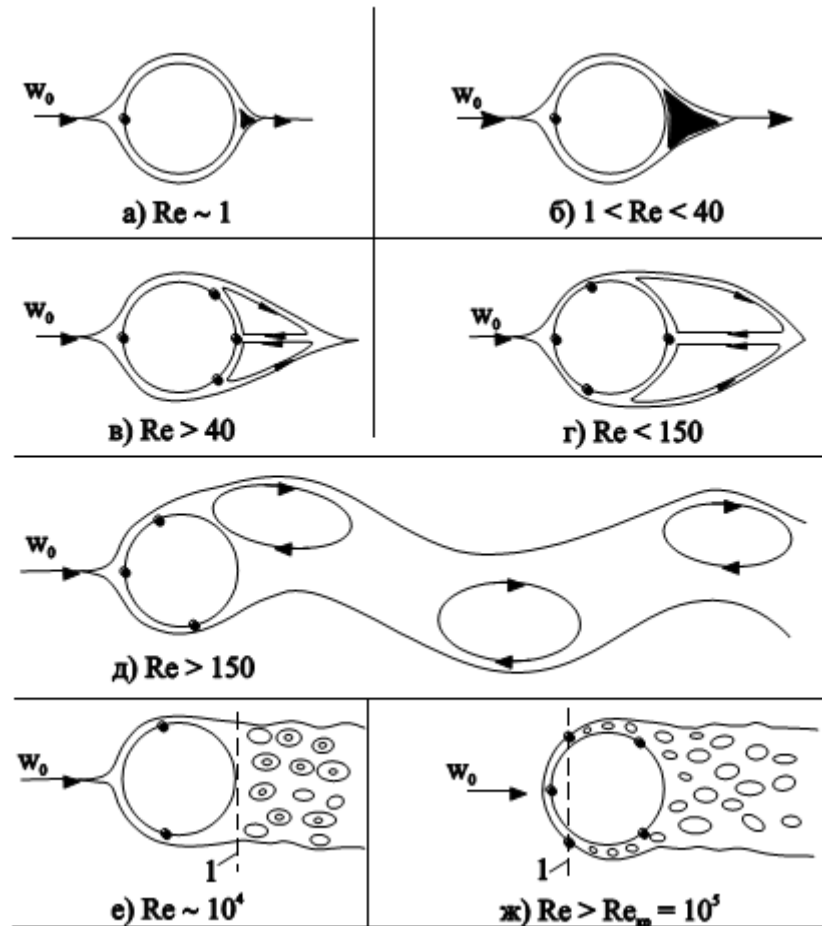


Рис. 16.3. Гидродинамика потока при поперечном обтекании трубы

Область течения флюида за трубой называют *следом*.

При числах Рейнольдса  $Re < 40$  (см. рис. 16.3,б) за цилиндром образуется застойная зона без отрыва потока от цилиндра. При числах Рейнольдса  $Re = 40 \div 150$  (см. рис. 16.3,в,г) на кормовой части трубы образуются два симметричных вихря, растущих с увеличением Рейнольдса.

После  $Re > 150$  (см. рис. 16.3,д) происходит периодический отрыв вихрей от кормовой части трубы и перемещение их вниз по потоку. При числах  $Re \geq 10^4$  след становится полностью турбулентным (см. рис. 16.3,е) и начинается непосредственно на поверхности трубы, а при значениях  $Re \geq Re_{кр} = 10^5$  турбулентным становится течение на поверхности цилиндра.

Средний по поверхности трубы (цилиндра) коэффициент теплоотдачи равен:

а) при  $1 < Re < 40$

$$\overline{Nu} = 0,76 \cdot Re^{0,4} \cdot Pr^{0,37} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (16.32)$$

б) при  $40 \leq Re < 10^3$

Лекция 16

$$\overline{Nu} = 0,52 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,37} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (16.33)$$

в) при  $10^3 \leq Re < 2 \cdot 10^5$

$$\overline{Nu} = 0,26 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,37} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (16.34)$$

г) при  $2 \cdot 10^5 \leq Re < 10^7$

$$\overline{Nu} = 0,026 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (16.35)$$

Определяющие параметры в формулах (16.32) – (16.35):

а)  $T_0 = T_f$  – температура текучей среды вдали от поверхности трубы (за пределами теплового пограничного слоя);

б)  $R_0 = d_H$  – наружный диаметр трубы;

в)  $w_0 = w_{max} = \frac{G}{\rho \cdot f_{min}}$  – максимальная скорость потока в самом узком поперечном сечении канала в ограниченном потоке (рис. 16.4,а) или скорость набегания неограниченного потока (рис. 16.4,б).

Температурную поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по уже знакомой нам формуле.  $\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}$

Поправку  $\varepsilon_q$ , учитывающую сужение потока в самом узком сечении канала (рис. 16.4), рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_q = \left[1 - \left(\frac{d_H}{H}\right)^2\right]^{0,8}, \quad (16.36)$$

где  $d_H$  – наружный диаметр трубы (цилиндра);  $H$  – поперечный размер канала.

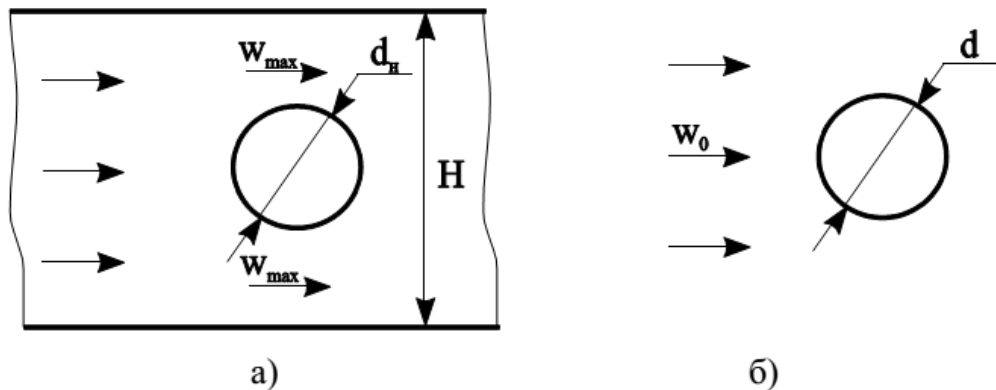


Рис. 16.4. Поперечное обтекание одиночной трубы:  
а – в ограниченном потоке; б – в неограниченном

## Лекция 16

Поправку  $\varepsilon_\varphi$ , учитывающую влияние угла атаки  $\varphi$  набегающего потока (угол атаки – угол между вектором скорости и осью трубы) на коэффициент теплоотдачи, приведены в табл. 16.4.

Таблица 16.4

Поправка на угол атаки набегающего потока							
$\varphi^\circ$	90	80	70	60	50	40	30
$\varepsilon_\varphi$	1,0	1,0	0,99	0,93	0,87	0,76	0,66

### 16.1.3.3. Теплоотдача при поперечном обтекании трубного пучка

Для увеличения поверхности теплообмена трубы собирают в пучки. Расположение труб в пучке относительно друг друга может быть в общем случае произвольным, однако в технике чаще всего применяют два типа пучков труб – коридорное (рис. 16.5,а) и шахматное (рис. 16.5,б).

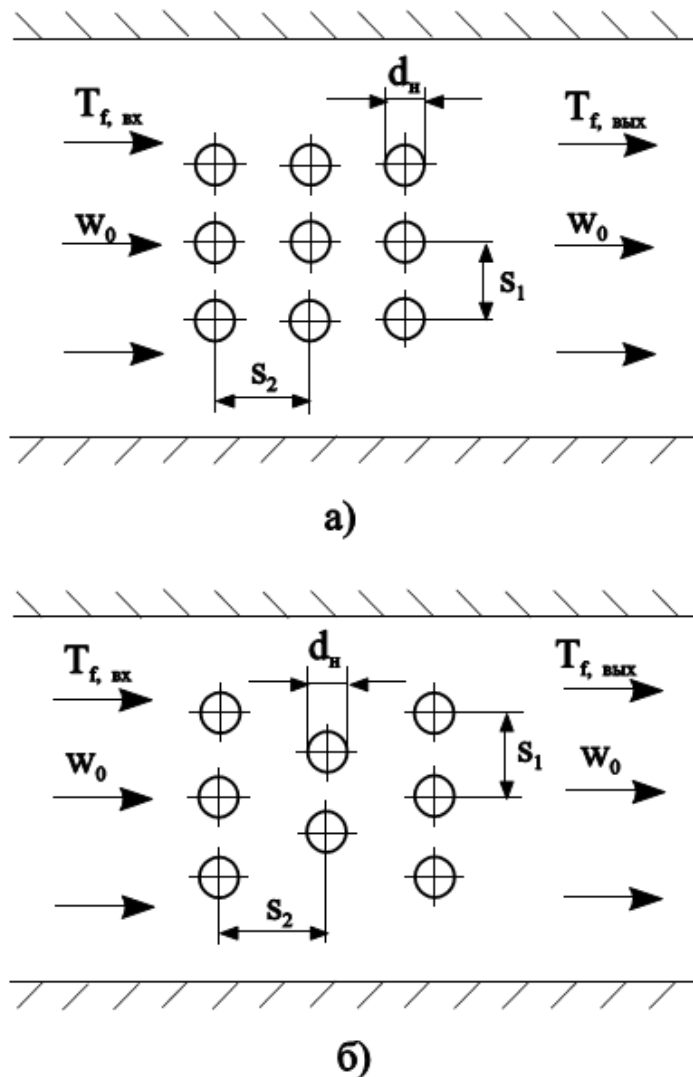


Рис. 16.5. Геометрические параметры шахматного (а) и коридорного (б) пучков

## Лекция 16

Пучок труб можно охарактеризовать следующими параметрами:

- а) поперечный шаг  $S_1$  – расстояние между осями соседних рядов труб поперек (перпендикулярно) потоку теплоносителя;
- б) продольный шаг  $S_2$  – расстояние между осями соседних рядов труб вдоль потока теплоносителя;
- в) число рядов труб поперек потока  $n_1$ ;
- г) число рядов труб вдоль потока  $n_2$ ;
- д) форма и размеры труб, которые в общем случае могут быть круглыми, овальными, треугольными, квадратными и т.д. Для труб круглого сечения задают наружный диаметр труб  $d_n$ . Соседние трубы в пучке оказывают влияние на гидродинамику и теплообмен друг друга, поэтому конвективная теплоотдача в пучках труб отличается от теплоотдачи около одиночной трубы. Режим течения флюида в пучках труб зависит от уровня турбулентности набегающего потока и критерия Рейнольдса.

В зависимости от критерия Рейнольдса при поперечном омывании пучков труб различают:

- а) при  $Re \leq 10^3$  – *ламинарный* режим течения;
- б) при  $Re \geq 2 \cdot 10^5$  – *турбулентный* режим течения;
- в) при  $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$  – *смешанный* режим течения – режим, при котором передняя (лобовая) часть трубы омывается ламинарным пограничным слоем, а задняя (кормовая) часть трубы омывается турбулентным потоком. Смешанный режим омывания пучков труб наиболее часто встречается в технических устройствах, поэтому для смешанного режима течения ниже приведено критериальное уравнение расчета коэффициента теплоотдачи. Средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_3$  для третьего ряда пучка труб и всех последующих рядов труб в пучке по направлению движения флюида при  $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$  равен:

$$\overline{Nu} = C \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (16.37)$$

где  $C = 0,26$  и  $n = 0,65$  при коридорном расположении труб в пучке (рис. 16.5,а);  $C = 0,41$  и  $n = 0,60$  при шахматном (рис. 16.5,б).

*Определяющие параметры* в формуле (16.37):

- а)  $T_0 = \overline{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f_{вх}} + T_{f_{вых}})$  – средняя температура флюида в пучке;
- б)  $R_0 = d_n$  – наружный диаметр трубы;
- в)  $w_0 = w_{max} = \frac{G}{\rho \cdot f_{min}}$  – максимальная скорость потока в самом узком поперечном сечении пучка.

## Лекция 16

Температурную поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}.$$

Поправка  $\varepsilon_\varphi$  учитывает влияние угла атаки  $\varphi$  набегающего потока на коэффициент теплоотдачи. Ее значения для пучка труб в зависимости от угла атаки  $\varphi$  приведены в табл. 16.5

Таблица 16.5

*Поправка на угол атаки набегающего потока в трубном пучке*

$\varphi^\circ$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$\varepsilon_\varphi$	1,0	1,0	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

Поправку  $\varepsilon_s$ , учитывающую взаимное расположение труб в пучке, рассчитывают по формулам:

а) для глубинных рядов труб коридорного пучка

$$\varepsilon_s = \left( \frac{d_H}{S_2} \right)^{0,15}; \quad (16.38)$$

б) для глубинных рядов труб шахматного пучка:

– при  $\frac{S_1}{S_2} < 2$

$$\varepsilon_s = \left( \frac{d_H}{S_2} \right)^{1/6}; \quad (16.39)$$

– при  $\frac{S_1}{S_2} \geq 2$

$$\varepsilon_s = 1,12; \quad (16.40)$$

где  $S_1$  – поперечный шаг труб в пучке;  $S_2$  – продольный шаг труб в пучке. Средний коэффициент теплоотдачи для труб первого ряда по направлению потока в коридорных и шахматных пучках равен:

$$\alpha_1 = 0,6\alpha_3; \quad (16.41)$$

Средний коэффициент теплоотдачи для труб второго ряда в коридорных и шахматных пучках равен:

а) коридорный пучок

$$\alpha_2 = 0,9\alpha_3; \quad (16.42)$$

б) шахматный пучок

$$\alpha_2 = 0,7\alpha_3; \quad (16.43)$$



## Лекция 16

где  $\alpha_3$  – коэффициент теплоотдачи для труб третьего ряда пучка. Средний коэффициент теплоотдачи для всего пучка при его обтекании жидкостью или газом при смешанном режиме течения в зависимости от числа рядов по ходу движения флюида ( $n \geq 3$ ) равен:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + (n_2 - 2) \cdot \alpha_3}{n_2}, \quad (16.44)$$

где  $n_2$  – число рядов труб по направлению движения флюида (жидкости или газа).