

15.1.2. 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

$$\overline{Nu} = f(Gr, Re, Pr), \quad (15.1)$$

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 $\ell_{нг}$. 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:

$$w(r) = w_0 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right], \quad (15.2)$$

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:

$$w(r) = w_0 \left(1 - \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (15.3)$$

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 $\ell_{нт}$ происходит

Лекция 15

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 ε_ρ для локальных коэффициентов теплоотдачи и $\bar{\varepsilon}_\rho$ для средних коэффициентов теплоотдачи.

15.1.2.1. 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 тчении 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; ρ – 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

$$\overline{Nu} = 4\varepsilon_t, \quad (15.4)$$

где температурную поправку ε_t рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (15.5)$$

Определяющие параметры в формуле (15.4):

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 15

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

$$\overline{Nu} = 1,55 \cdot \left(\frac{Pe \cdot d_{вн}}{\ell} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14} \cdot \bar{\varepsilon}_\ell, \quad (15.6)$$

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

Определяющие параметры в формуле (15.6):

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 ε рассчитывают по формулам:

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

$$\bar{\varepsilon}_\ell = 0,6 \cdot \left(\frac{\ell}{Re \cdot d} \right)^{-1/7} \cdot \left(1 + 2,5 \cdot \frac{\ell}{Re \cdot d} \right); \quad (15.7)$$

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

$$\bar{\varepsilon}_\ell \approx 1, \quad (15.8)$$

Лекция 15

где ℓ – длина трубы.

Определяющие параметры в формулах (15.7) и (15.8):

- 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

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,15 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Pr_f^{0,33} \cdot (Gr_{f,d} Pr_f)^{0,1} \cdot \varepsilon_t \bar{\varepsilon}_\ell. \quad (15.9)$$

Определяющие параметры в формуле (15.9):

- 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 ε_t , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (15.10)$$

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. 15.1;
- б) при $\frac{\ell}{d} \geq 50$ $\bar{\varepsilon}_\ell = 1$

Таблица 15.1

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

Лекция 15

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

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,021 \cdot Re_{f,d}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \varepsilon_t \overline{\varepsilon}_\ell. \quad (15.11)$$

Определяющие параметры в формуле (15.11):

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 ε_t , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (15.10).

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. 15.2.

Таблица 15.2

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

$Re \cdot 10^{-4}$	ℓ/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. 15.2 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

$$\overline{Nu}_{f,d} = K_0 \cdot Pr_{f,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \overline{\varepsilon}_\rho, \quad (15.12)$$

где комплекс K_0 зависит от числа Рейнольдса (см. табл. 15.3), а поправку $\overline{\varepsilon}_\rho$ рассчитывают так же, как и при турбулентном режиме течения флюида.

Таблица 15.3

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 ε_t , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (15.10).

Определяющие параметры в формуле (15.12):

- 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:

$$\overline{Nu} = \gamma \cdot \overline{Nu}_{турб} + (1 - \gamma) \cdot \overline{Nu}_{лам}, \quad (15.13)$$

где $\overline{Nu}_{лам}$ и $\overline{Nu}_{турб}$ – числа Нуссельта, рассчитанные по формулам (15.4) и (15.11) для стабилизированного ламинарного и турбулентного режимов течения соответственно; γ – коэффициент перемежаемости, равный:

$$\gamma = 1 - \exp\left(1 - \frac{Re}{2300}\right). \quad (15.14)$$

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 15

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 (15.18), (15.19) и (15.50) можно упростить и записать в виде

а) ламинарный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,146 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Gr_{f,d}^{0,1}; \quad (15.15)$$

б) турбулентный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,018 \cdot Re_{f,d}^{0,8}; \quad (15.16)$$

в) переходный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,86 \cdot K_0; \quad (15.17)$$

Замечание. При больших температурных напорах и турбулентном режиме течения газов коэффициенты теплоотдачи могут отличаться от значений, вычисленных по уравнениям (15.15), (15.16) и (15.17). В этом случае расчет необходимо проводить по формулам (15.9), (15.11) и (15.12), принимая в качестве температурной поправки выражение

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\overline{T}_f}{\overline{T}_w}\right)^m, \quad (15.18)$$

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 (15.15), (15.16) и (15.17):

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.

15.1.2.2. 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 15

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

$$R_0 = d_{\text{экв}} = d_{\Gamma} = 4 \frac{F}{P}, \quad (15.19)$$

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

Рассмотрим пример расчета эквивалентного (гидравлического) диаметра каналов некруглой формы, изображенных на рис. 15.1. При частичном заполнении канала прямоугольной формы с размерами $a \times b$ капельной жидкостью по высоте канала на $a/4$ (см. рис. 15.1,а) эквивалентный диаметр равен:

$$R_0 = d_{\text{экв}} = 4 \frac{\frac{a}{4} \cdot b}{2 \frac{a}{4} + 2b}. \quad (15.20)$$

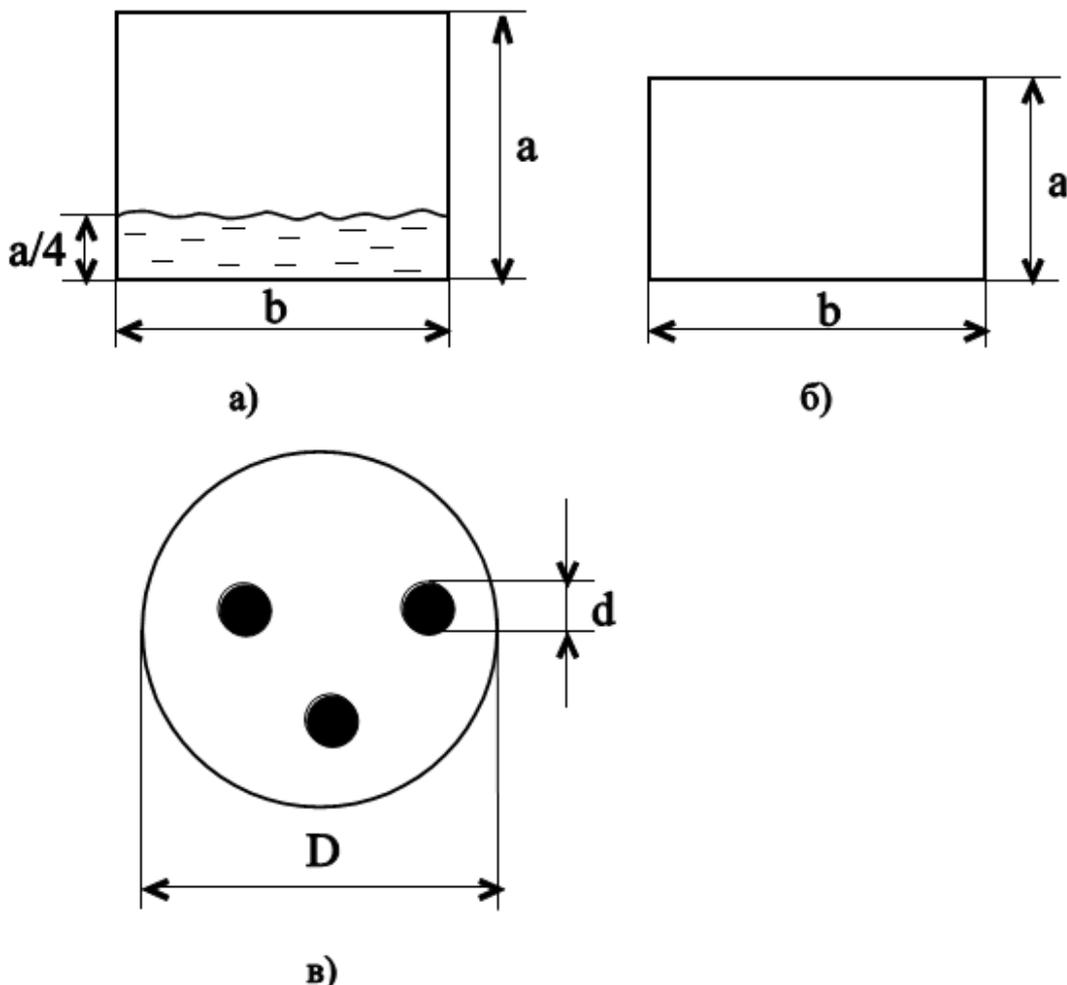


Рис. 15.1. Каналы различной формы

15.1.2.3. 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 (15.11) для турбулентного режима в прямых гладких трубах и умножают на поправочный коэффициент, учитывающий увеличение коэффициента теплоотдачи:

$$\varepsilon_{\Gamma} = 1 + 1,8 \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{R_{\Gamma}}, \quad (15.21)$$

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

15.1.3. КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ВНЕШНЕМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ

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

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (15.22)$$

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

15.1.3.1. Продольное обтекание пластины и внешней поверхности трубы

Схема формирования гидродинамического пограничного слоя при обтекании плоской пластины с острой кромкой показана на рис. 15.2. Область пограничного слоя – область, в которой скорость потока изменяется от нуля на стенке до скорости невозмущенного потока w_0 за пределами пограничного слоя.

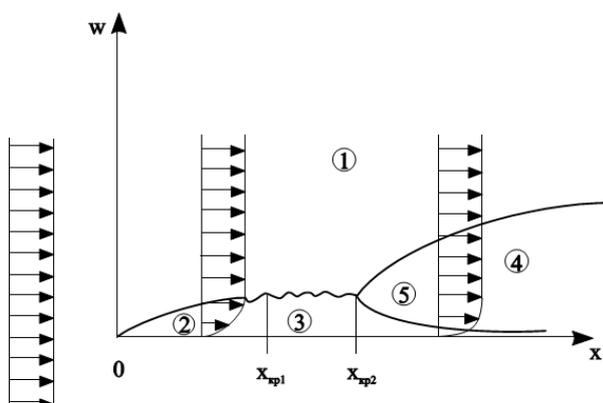


Рис. 15.2. Гидродинамический пограничный слой при продольном обтекании пластины:

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 15

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 $T_w = \text{const}$

$$Nu_x = 0,332 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}; \quad (15.23)$$

$$\overline{Nu} = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}; \quad (15.24)$$

б) при $Q_w = \text{const}$

$$Nu_x = 0,46 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}; \quad (15.25)$$

$$\overline{Nu} = 0,69 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}. \quad (15.26)$$

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

$$Nu_x = 0,0296 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}; \quad (15.27)$$

$$\overline{Nu} = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}. \quad (15.28)$$

Определяющие параметры в формулах (15.23) – (15.28):

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

Лекция 15

б) $R_0 = x$ – продольная координата в формулах (15.23), (15.25) и (15.27);

в) $R_0 = \ell$ – длина пластины или трубы в формулах (15.24), (15.26) и (15.28);

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 $Re_x \leq 5 \cdot 10^5$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{4,64}{Re_x^{0,5}}; \quad (15.29)$$

б) при $Re_x > 5 \cdot 10^5$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,376}{Re_x^{0,2}}; \quad (15.30)$$

Определяющие параметры в формулах (15.29), (15.30):

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).

15.1.3.2. Теплоотдача при поперечном обтекании одиночной трубы

Гидродинамика потока при поперечном обтекании одиночной трубы (цилиндра) в зависимости от критерия Рейнольдса показана на рис. 15.3. Критерий Рейнольдса в этом случае рассчитывают по формуле

$$Re = \frac{w_0 R_0}{\nu} = \frac{w_0 d_n}{\nu}, \quad (15.31)$$

где w_0 – скорость набегающего потока;

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

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

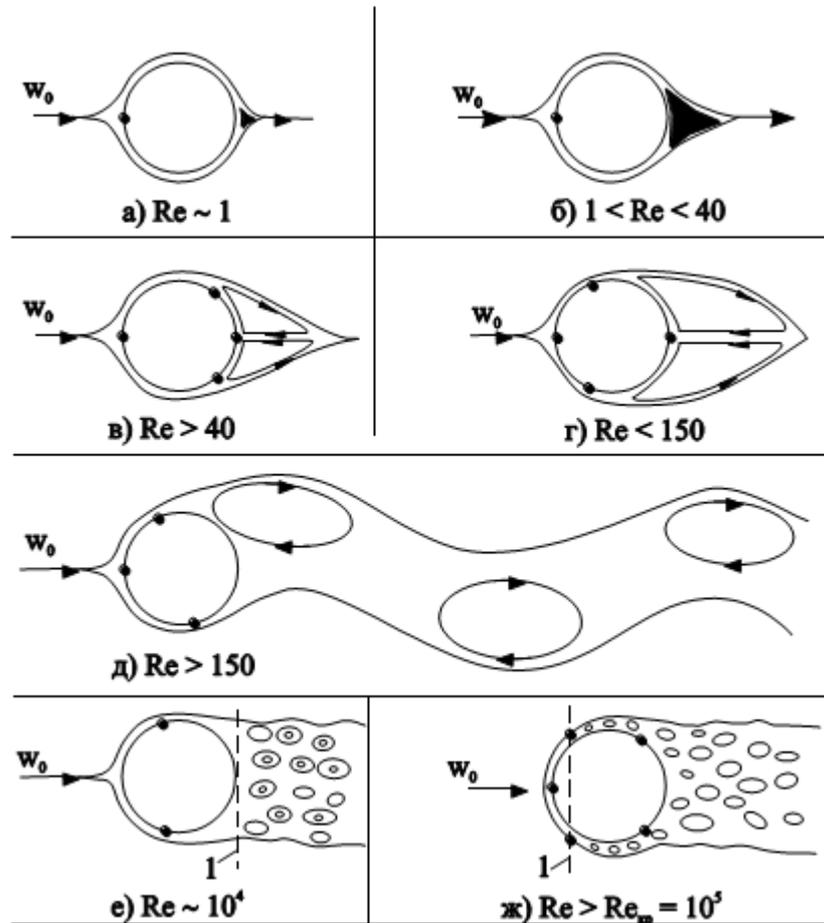


Рис. 15.3. Гидродинамика потока при поперечном обтекании трубы

Область течения флюида за трубой называют *следом*.

При числах Рейнольдса $Re < 40$ (см. рис. 15.3,б) за цилиндром образуется застойная зона без отрыва потока от цилиндра. При числах Рейнольдса $Re = 40 \div 150$ (см. рис. 15.3,в,г) на кормовой части трубы образуются два симметричных вихря, растущих с увеличением Рейнольдса.

После $Re > 150$ (см. рис. 15.3,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. 15.3,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 $1 < Re < 40$

$$\overline{Nu} = 0,76 \cdot Re^{0,4} \cdot Pr^{0,37} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (15.32)$$

б) при $40 \leq Re < 10^3$

Лекция 15

$$\overline{Nu} = 0,52 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,37} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (15.33)$$

в) при $10^3 \leq Re < 2 \cdot 10^5$

$$\overline{Nu} = 0,26 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,37} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (15.34)$$

г) при $2 \cdot 10^5 \leq Re < 10^7$

$$\overline{Nu} = 0,026 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (15.35)$$

Определяющие параметры в формулах (15.32) – (15.35):

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. 15.4,а) или скорость набегания неограниченного потока (рис. 15.4,б).

Температурную поправку ε_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 ε_q , учитывающую сужение потока в самом узком сечении канала (рис. 15.4), рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_q = \left[1 - \left(\frac{d_H}{H}\right)^2\right]^{0,8}, \quad (15.36)$$

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

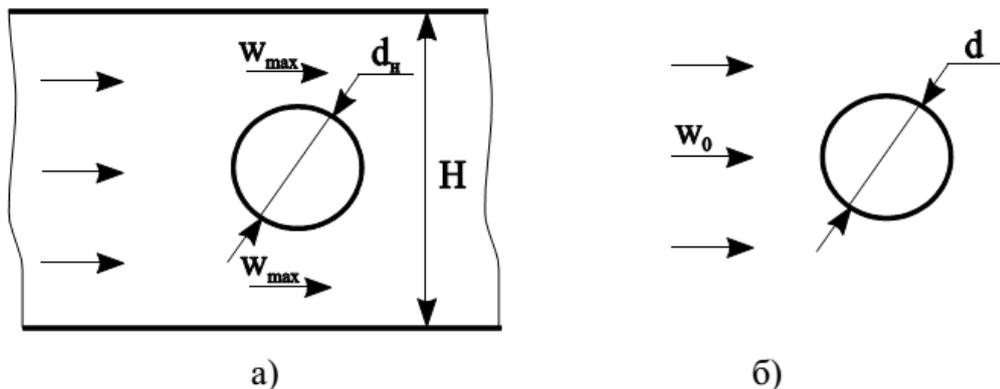


Рис. 15.4. Поперечное обтекание одиночной трубы:
а – в ограниченном потоке; б – в неограниченном

Лекция 15

Поправку ϵ_φ , учитывающую влияние угла атаки φ набегающего потока (угол атаки – угол между вектором скорости и осью трубы) на коэффициент теплоотдачи, приведены в табл. 15.4.

Таблица 15.4

Поправка на угол атаки набегающего потока							
φ°	90	80	70	60	50	40	30
ϵ_φ	1,0	1,0	0,99	0,93	0,87	0,76	0,66

15.1.3.3. 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. 15.5,а) и шахматное (рис. 15.5,б).

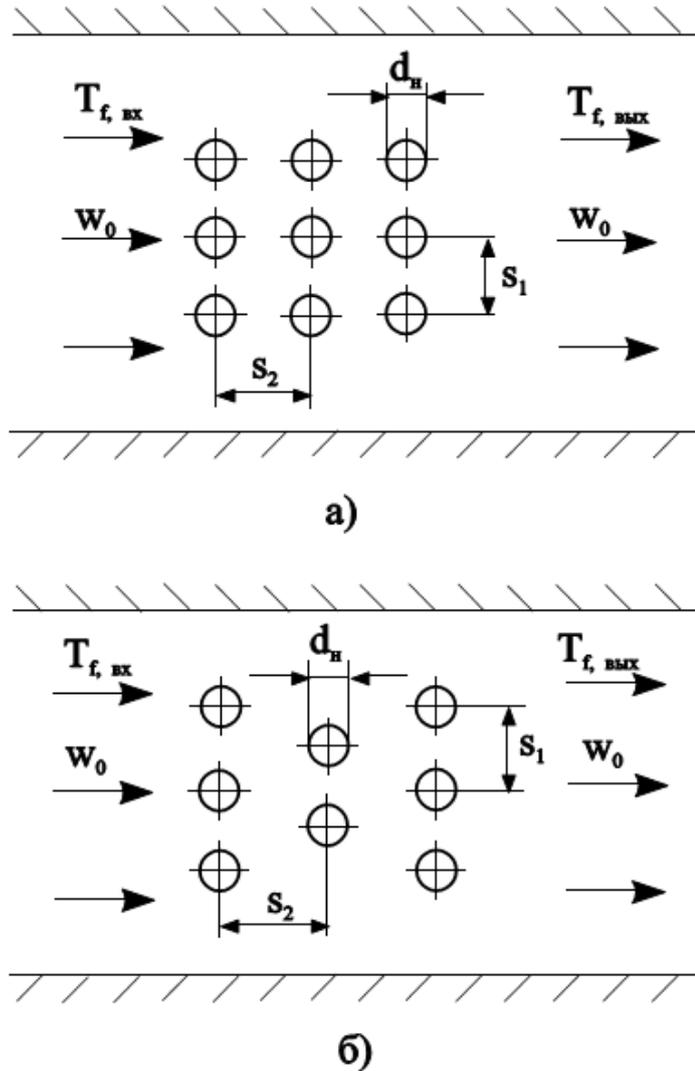


Рис. 15.5. Геометрические параметры шахматного (а) и коридорного (б) пучков

Лекция 15

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 α_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:

$$\overline{Nu} = C \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (15.37)$$

где $C = 0,26$ и $n = 0,65$ при коридорном расположении труб в пучке (рис. 15.5,а); $C = 0,41$ и $n = 0,60$ при шахматном (рис. 15.5,б).

Определяющие параметры в формуле (15.37):

- 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 15

Температурную поправку ε_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 ε_φ учитывает влияние угла атаки φ набегающего потока на коэффициент теплоотдачи. Ее значения для пучка труб в зависимости от угла атаки φ приведены в табл. 15.5

Таблица 15.5

Поправка на угол атаки набегающего потока в трубном пучке

φ°	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_φ	1,0	1,0	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

Поправку ε_s , учитывающую взаимное расположение труб в пучке, рассчитывают по формулам:

а) для глубинных рядов труб коридорного пучка

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d_H}{S_2} \right)^{0,15}; \quad (15.38)$$

б) для глубинных рядов труб шахматного пучка:

– при $\frac{S_1}{S_2} < 2$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d_H}{S_2} \right)^{1/6}; \quad (15.39)$$

– при $\frac{S_1}{S_2} \geq 2$

$$\varepsilon_s = 1,12; \quad (15.40)$$

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:

$$\alpha_1 = 0,6\alpha_3; \quad (15.41)$$

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

а) коридорный пучок

$$\alpha_2 = 0,9\alpha_3; \quad (15.42)$$

б) шахматный пучок

$$\alpha_2 = 0,7\alpha_3; \quad (15.43)$$

Лекция 15

где α_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:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + (n_2 - 2) \cdot \alpha_3}{n_2}, \quad (15.44)$$

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