

14.1. УРАВНЕНИЯ ПОДОБИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Функциональную связь между определяемыми и определяющими критериями называют уравнениями подобия. Для расчета среднего по поверхности безразмерного коэффициента теплоотдачи – критерия Нуссельта в стационарных задачах конвективного теплообмена используют следующие уравнения подобия:

- ✓ свободная конвекция $\overline{Nu} = f(Gr, Pr)$;
- ✓ вынужденная конвекция (ламинарный режим течения флюида)
 $\overline{Nu} = f(Gr, Re, Pr)$;
- ✓ вынужденная конвекция (переходный и турбулентный режимы течения) $\overline{Nu} = f(Re, Pr)$;

где \overline{Nu} – среднее по всей поверхности теплообмена значение критерия Нуссельта.

Уравнения подобия получают в два этапа. На первом этапе строят физическую модель процесса, соблюдая правила моделирования, и выполняют эксперимент на модели.

В модели и объекте моделирования добиваются равенства определяющих критериев:

$$Re_{\text{мод}} = Re_{\text{обр}}, \quad Gr_{\text{мод}} = Gr_{\text{обр}}, \quad Pe_{\text{мод}} = Pe_{\text{обр}}, \quad (14.1)$$

где индекс «мод» означает «модель», а индекс «обр» – «образец» («объект моделирования»).

На втором этапе моделирования по результатам эксперимента на модели рассчитывают коэффициент теплоотдачи по формуле (14.14), следующей из закона Ньютона. Затем рассчитывают безразмерный коэффициент теплоотдачи в модели $Nu_{\text{мод}}$ или $St_{\text{мод}}$, который согласно правилу теории подобия при выполнении условия (14.1) равен безразмерному коэффициенту теплоотдачи в объекте моделирования:

$$Nu_{\text{мод}} = Nu_{\text{обр}} \text{ или } St_{\text{мод}} = St_{\text{обр}}. \quad (14.2)$$

При построении модели и обработке результатов эксперимента в виде критериальных формул необходимо задать определяющие параметры, которые прямо или косвенно входят в критерии подобия. В стационарных задачах конвективного теплообмена к определяющим параметрам относят:

R_0 – определяющий (характерный) размер области конвективного теплообмена;

T_0 – определяющую (характерную) температуру в области конвективного теплообмена;

w_0 – определяющую скорость в задачах вынужденной конвекции.

Лекция 14

Теория подобия не дает однозначного ответа на вопрос, какие величины принимать в качестве определяющих параметров. Поэтому эту задачу решает сам автор критериального уравнения. В качестве определяющего размера необходимо принимать геометрический размер системы конвективного теплообмена, от которого зависит процесс свободной или вынужденной конвекции. Например, при свободной конвекции около вертикальных поверхностей в качестве определяющего размера R_0 логично принять высоту объекта ($R_0 = H$), т.к. в этом случае ширина поверхности не влияет на конвекцию флюида.

В качестве определяющей температуры, как правило, принимают температуру, которую можно измерить или рассчитать. По значению определяющей температуры находят в справочных таблицах физические свойства текучей среды (λ , ρ , ν и т.д.).

Определяющую скорость движения флюида:

- ✓ для замкнутых систем находят из интегрального уравнения неразрывности

$$w_0 = \frac{G}{\rho F}, \quad (14.3)$$

где G – расход флюида, кг/с; ρ – плотность, кг/м³; F – площадь поперечного сечения для прохода теплоносителя, м²;

- ✓ для разомкнутых систем принимают равной скорости текучей среды за пределами гидродинамического пограничного слоя (скорости невозмущенного потока):

$$w_0 = w_f. \quad (14.4)$$

Замечание. При использовании критериальных уравнений, приведенных в справочной литературе, определяющие параметры необходимо принимать, следуя указаниям автора критериальной формулы. Назначенные автором определяющие (характерные) параметры R_0 , T_0 и w_0 указывают в комментариях к критериальному уравнению.

Конкретный вид функциональной зависимости в уравнениях подобия задает автор формулы. В принципе, для аппроксимации экспериментальных данных можно использовать любую полиномиальную зависимость. В отечественной литературе, как правило, в качестве аппроксимирующих уравнений применяют степенные функции. Например, для расчета среднего по поверхности безразмерного коэффициента теплоотдачи – критерия Нуссельта – в стационарных задачах конвективного теплообмена используют следующие уравнения подобия:

- ✓ при свободной конвекции

$$\overline{Nu} = c \cdot Gr^n \cdot Pr^m \cdot \varepsilon_t; \quad (14.5)$$

Лекция 14

- ✓ при вынужденной конвекции (ламинарный режим течения флюида)

$$\overline{Nu} = c \cdot Gr^k \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot \varepsilon_t \cdot \prod_{i=1}^n \varepsilon_i; \quad (14.6)$$

- ✓ при вынужденной конвекции (переходный и турбулентный режимы течения)

$$\overline{Nu} = c \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot \varepsilon_t \cdot \prod_{i=1}^n \varepsilon_i; \quad (14.7)$$

где \overline{Nu} – среднее по всей поверхности теплообмена значение критерия Нуссельта; Gr – критерий Грасгофа; Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля; c, n, m, k – эмпирические коэффициенты, которые находят путем статистической обработки экспериментальных данных при помощи стандартных программ, входящих в программное обеспечение персональных компьютеров; ε_t – поправка, учитывающая зависимость физических свойств флюида от температуры; ε_i – поправка, учитывающая особенности течения и теплообмена в заданной системе конвективного теплообмена.

14.2. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ПО КРИТЕРИАЛЬНЫМ УРАВНЕНИЯМ ПОДОБИЯ

В настоящее время ученые-теплотехники получили критериальные уравнения подобия конвективной теплоотдачи для решения практически всех инженерных задач.

Расчет коэффициента теплоотдачи по критериальным формулам следует выполнять в определенной последовательности.

1. Определить вид конвективного теплообмена (свободная или вынужденная конвекция) и объект, в котором рассчитывают конвективную теплоотдачу. Например, свободная конвекция около горизонтальной трубы или вынужденная конвекция при течении в канале квадратного сечения и т.д. В справочной литературе найти критериальные формулы для расчета заданного вида конвективного теплообмена.
2. Следуя требованиям, изложенным в комментариях к критериальным формулам, рассчитать определяющие параметры:
 - ✓ определяющий размер R_0 ;
 - ✓ определяющую температуру T_0 ;
 - ✓ определяющую скорость w_0 при вынужденной конвекции.
3. Определить режим течения среды для уточнения вида критериальной формулы.
Режим течения определить:
 - ✓ при вынужденном движении по величине критерия Рейнольдса (Re);

Лекция 14

- ✓ при свободном движении по величине критерия Рэлея (Ra).
- 4. По критериальному уравнению рассчитать безразмерный коэффициент теплоотдачи – число Нуссельта (Nu) или число Стантона (St).
- 5. Рассчитав значение безразмерного коэффициента теплоотдачи, найти коэффициент конвективной теплоотдачи α по формулам:

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{R_0} \quad (14.8)$$

или

$$\alpha = St \cdot \rho \cdot c_p \cdot \bar{w}. \quad (14.9)$$

14.3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ФЛЮИДА НА ТЕПЛООТДАЧУ

Физические свойства текучей среды зависят от температуры, которая при конвективной теплоотдаче изменяется в пределах теплового пограничного слоя (рис. 14.1) от температуры стенки (T_w) до температуры флюида (T_f). При этом при поступлении теплоты к стенке температура теплоносителя выше температуры стенки ($T_f > T_w$) и соответственно наоборот, при теплоотдаче от стенки к теплоносителю температура стенки выше температуры текучей среды ($T_w > T_f$). Возникает вопрос, какую температуру из интервала температур ($T_w \div T_f$) следует принимать в качестве определяющей температуры. При моделировании по методу теории подобия за определяющую температуру чаще всего принимают:

- ✓ среднюю температуру флюида в системе конвективного теплообмена $T_0 = \bar{T}_f$;
- ✓ температуру флюида за пределами теплового пограничного слоя $T_0 = T_f$;
- ✓ среднюю температуру теплового пограничного слоя $T_0 = 0,5(T_w + T_f)$.

Однако могут быть и другие варианты задания определяющей температуры по усмотрению автора критериального уравнения.

Любой вариант задания определяющей температуры заранее содержит ошибку в определении физических свойств текучей среды, поскольку не учитывает изменение температуры флюида в тепловом пограничном слое. Для уменьшения погрешности, связанной с неточным заданием определяющей температуры, в критериальные уравнения подобия, аппроксимирующие эксперимент, вводят температурную поправку ε_t .

Формулу для расчета температурной поправки ε_t получает автор формулы исходя из требования минимальной погрешности при аппроксимации экспериментальных данных. В отечественной литературе наиболее часто используют температурную поправку, предложенную академиком М.А. Михеевым

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (14.10)$$

где Pr_f – критерий Прандтля флюида при температуре флюида T_f (за пределами теплового пограничного слоя);

Pr_w – критерий Прандтля флюида при температуре стенки T_w .

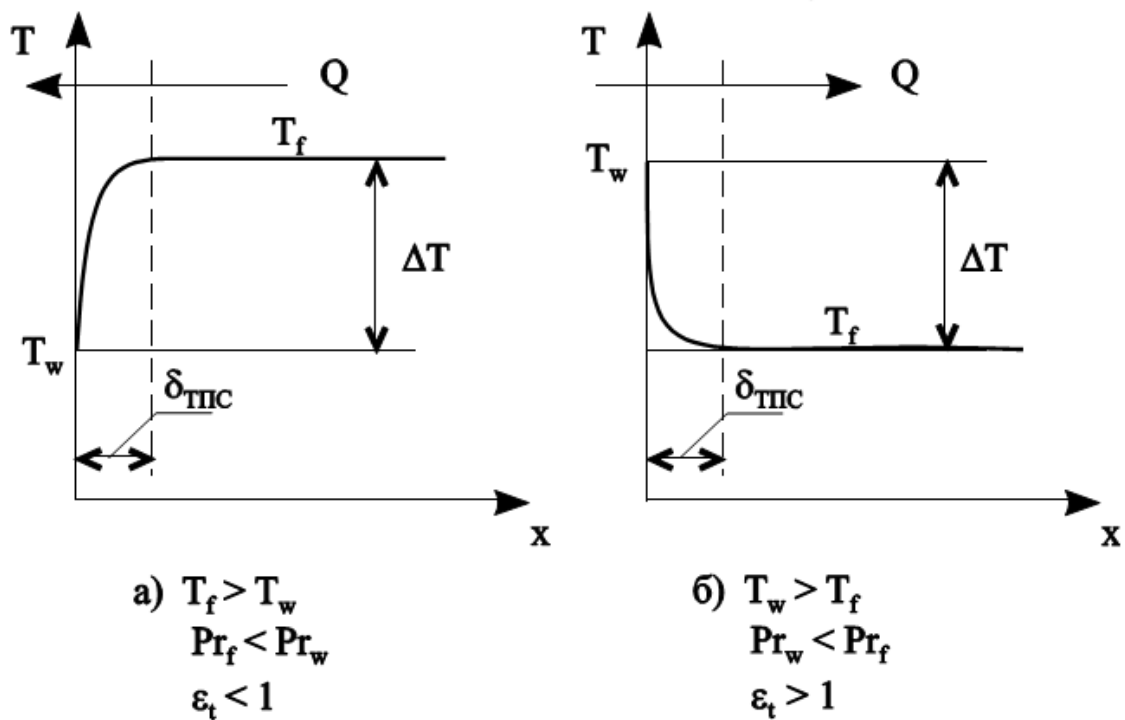


Рис. 14.1. Влияние направления теплового потока на теплоотдачу

В инженерных расчетах критерий Прандтля для газов слабо зависит от температуры, поэтому для газов $Pr_f \approx Pr_w$ и в этом случае температурная поправка $\varepsilon_t = 1$.

Для капельных жидкостей, применяемых в энергетике, критерий Прандтля уменьшается с ростом температуры, поэтому при теплоотдаче от флюида к стенке (рис. 14.1, а)

$$T_f > T_w \Rightarrow Pr_f < Pr_w \text{ и } \varepsilon_t < 1 \quad (14.11)$$

и, соответственно наоборот, при теплоотдаче от стенки к флюиду (рис. 14.1, б)

$$T_f < T_w \Rightarrow Pr_f > Pr_w \text{ и } \varepsilon_t > 1 \quad (14.12)$$

Анализируя критериальные формулы (14.5) – (14.7) можно сделать вывод о том, что при равном для обоих случаев теплоотдачи температурном напоре между стенкой и флюидом ($\Delta T = |T_f - T_w|$) коэффициент теплоотдачи от

Лекция 14

флюида к стенке будет меньше коэффициента теплоотдачи от стенки к флюиду:

$$Nu_{f \rightarrow w} < Nu_{w \rightarrow f} \quad (14.13)$$

и соответственно

$$\alpha_{f \rightarrow w} < \alpha_{w \rightarrow f} \quad (14.14)$$

А следовательно, и тепловой поток при конвективной теплоотдаче при прочих равных условиях больше от стенки к флюиду (охлаждение стенки) по сравнению с тепловым потоком от флюида к стенке (нагрев стенки):

$$Q_{w \rightarrow f} > Q_{f \rightarrow w} \quad (14.15)$$

14.4. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ (ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ)

Результаты многочисленных экспериментов, выполненных для определения коэффициента конвективной теплоотдачи по методу теории подобия, оформлены в виде критериальных уравнений. Рассмотрим наиболее часто используемые в инженерных расчетах критериальные формулы для расчета безразмерного коэффициента теплоотдачи в условиях свободной и вынужденной конвекции.

Все экспериментальные данные получают с погрешностью, зависящей от конструкции опытной установки, используемых измерительных приборов, культуры проведения эксперимента, опыта экспериментатора и т.д. Вследствие этого результаты опытного определения коэффициента теплоотдачи у разных авторских коллективов отличаются в пределах погрешности, которую оценивают в интервале 5÷20 %. Поэтому для ряда систем конвективной теплоотдачи ниже приведены критериальные формулы нескольких ученых, отличающихся друг от друга по форме записи и принятой в расчетах определяющей (характерной температуре). При этом нельзя утверждать, какая формула точнее, поэтому в инженерных расчетах можно применять критериальную формулу любого ученого.

Критериальные уравнения расчета безразмерного коэффициента теплоотдачи приведены для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения флюида с указанием определяющих параметров и поправок на отличие данного режима теплообмена от режима, принятого в качестве стандартного для данной системы тел.

Мы рассмотрим только критериальные уравнения для газов и капельных жидкостей, у которых критерий Прандтля $Pr \geq 0,7$. Критериальные формулы для расчета коэффициента жидкометаллических теплоносителей, у которых критерий Прандтля $Pr \ll 1$, приведены в специальной литературе.

**14.4.1. КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛОТДАЧА
ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ**

В этом случае безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий (число) Нуссельта зависит от критериев Грасгофа и Прандтля:

$$Nu = f(Gr, Pr) = f(Ra), \quad (14.16)$$

где $Ra = Gr \cdot Pr$ – критерий Рэлея; $Gr = \frac{gR_0^3}{\nu^2} \beta \Delta T$ – критерий Грасгофа;
 $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля.

**14.4.1.1. Теплоотдача при свободной конвекции
около вертикальных пластин и вертикальных труб
(формулы В.П. Исаченко)**

Местный (локальный) и средний коэффициенты теплоотдачи при свободной конвекции около вертикальных объектов (пластин, труб и т.д.) зависят от режима течения флюида.

А. Ламинарный режим течения флюида $10^3 < Ra \leq 10^9$

При постоянной температуре теплоотдающей или тепловоспринимающей поверхности ($T_w = \text{const}$) локальный и средний коэффициенты теплоотдачи рассчитывают по формулам

$$Nu_{f,x} = 0,55 Ra_{f,x}^{0,25} \cdot \varepsilon_t, \quad (14.17)$$

$$\overline{Nu}_f = 0,73 Ra_f^{0,25} \cdot \varepsilon_t, \quad (14.18)$$

При постоянном тепловом потоке ($Q_w = \text{const}$), поступающем на тепловоспринимающую поверхность или уходящем с теплоотдающей поверхности, локальный и средний коэффициенты теплоотдачи рассчитывают по формулам

$$Nu_{f,x} = 0,60 Ra_{f,x}^{0,25} \cdot \varepsilon_t, \quad (14.19)$$

$$\overline{Nu}_f = 0,75 Ra_f^{0,25} \cdot \varepsilon_t, \quad (14.20)$$

Температурную поправку в формулах (14.17)–(14.20) рассчитывают по формуле М.А. Михеева (14.10).

Определяющие параметры в формулах (14.17)–(14.20):

- а) $R_0 = x$ – локальная координата по высоте – для формул (14.17) и (14.19);
- б) $R_0 = h$ – высота вертикальной пластины или высота вертикальной трубы – для формул (14.18) и (14.20);
- в) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя).

Лекция 14

Б. Турбулентный режим течения флюида $Ra \geq 6 \cdot 10^{10}$

При постоянной температуре ($T_w = \text{const}$) и постоянном тепловом потоке ($Q_w = \text{const}$) локальный и средний коэффициенты теплоотдачи рассчитывают по формулам:

$$Nu_{f,x} = 0,15 Ra_{f,x}^{0,333} \cdot \varepsilon_t, \quad (14.21)$$

$$\overline{Nu}_f = 0,15 Ra_f^{0,333} \cdot \varepsilon_t. \quad (14.22)$$

Температурную поправку в формулах (14.21)–(14.22) рассчитывают по формуле М.А. Михеева (14.10).

Определяющие параметры в формулах (14.21)–(14.22):

- а) $R_0 = x$ – локальная координата по высоте в формуле (14.21);
- б) $R_0 = h$ – высота вертикальной пластины или высота вертикальной трубы в формуле (14.22);
- в) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя).

В. Переходный режим течения флюида $10^9 < Ra < 6 \cdot 10^{10}$

Переходный режим течения флюида наступает при числах Релея $10^9 < Ra_{f,x} < 6 \cdot 10^{10}$ и отличается неустойчивостью течения. В приближенных расчетах теплоотдачи при переходном режиме В.П. Исаченко рекомендует использовать формулы (14.21) и (14.22) для турбулентного режима течения.

Изменение коэффициента теплоотдачи по высоте вертикальной поверхности

Критериальные уравнения (14.17)–(14.18) аппроксимируют результаты эксперимента, поэтому их анализ позволит выявить зависимость локального коэффициента теплоотдачи от высоты вертикального объекта (вертикальная пластина, вертикальная труба и т.д.) $\alpha = f(x)$, где x – координата вертикального объекта, которая отсчитывается от нижней кромки объекта. Пусть температура поверхности вертикального объекта будет выше температуры окружающей среды.

Раскрывая значение критериев в формуле (14.17) для ламинарного режима течения, получим

$$\frac{\alpha x}{\lambda} = 0,55 \left(\frac{g x^3}{\nu^2} \beta \Delta T \frac{\nu}{\alpha} \right)^{0,25} \varepsilon_t, \quad (14.23)$$

откуда коэффициент теплоотдачи равен

$$\alpha = \frac{(x^3)^{0,25}}{x} \cdot A = \frac{x^{0,75}}{x} \cdot A = x^{-0,25} \cdot A, \quad (14.24)$$

Лекция 14

где $A = 0,55 \left(\frac{g}{\nu^2} \beta \Delta T \frac{\nu}{a} \right)^{0,25} \varepsilon_t \lambda$ – комплекс, не зависящий от вертикальной координаты x .

Таким образом, $\alpha \sim x^{-0,25}$, то есть коэффициент теплоотдачи убывает с ростом вертикальной координаты по степенному закону с показателем степени $-0,25$.

Рассуждая аналогично для турбулентного режима течения, который характеризует критериальное уравнение (14.21), получим

$$\frac{\alpha x}{\lambda} = 0,15 \left(\frac{g x^3}{\nu^2} \beta \Delta T \frac{\nu}{a} \right)^{0,333} \varepsilon_t, \quad (14.25)$$

откуда коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{(x^3)^{0,333}}{x} \cdot B = \frac{x}{x} \cdot B = B \neq f(x), \quad (14.26)$$

где $B = 0,15 \left(\frac{g}{\nu^2} \beta \Delta T \frac{\nu}{a} \right)^{0,333} \varepsilon_t \lambda$ – комплекс, не зависящий от вертикальной координаты x .

То есть что при турбулентном режиме свободной конвекции около вертикального объекта коэффициент теплоотдачи не зависит от координаты, т.е. не изменяется по высоте вертикального тела.

Зависимость $\alpha = f(x)$ около нагретой вертикальной пластины для всех режимов течения флюида показана на рис. 14.2.

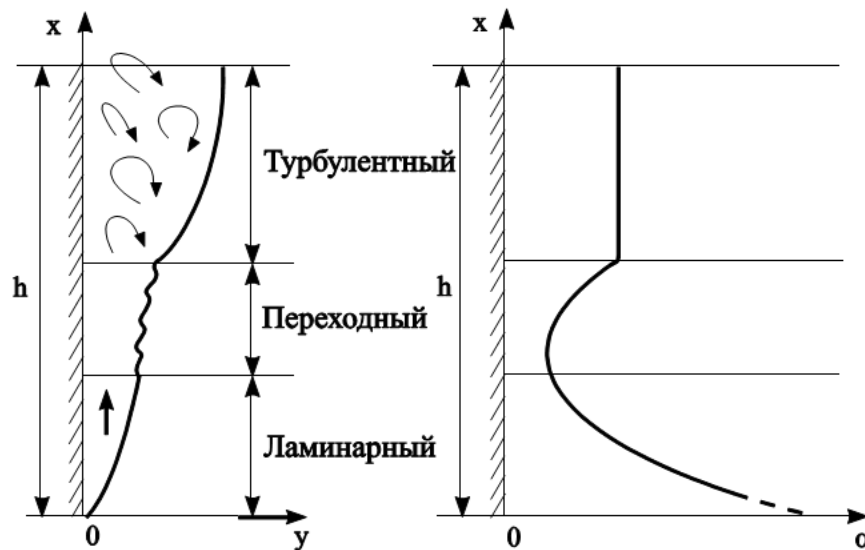


Рис. 14.2. Изменение коэффициента теплоотдачи вдоль нагретой вертикальной пластины $T_w > T_f$

14.4.1.2. Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальных пластин (формулы В.П. Исаченко)

Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности горизонтальных пластин можно приближённо рассчитать по формулам для вертикальной поверхности (14.18), (14.20) и (14.22) с последующим введением поправок на расположение теплоотдающей поверхности:

– для поверхности теплообмена, обращенной вверх

$$\bar{\alpha}_{\text{гор}} = 1,3 \cdot \bar{\alpha}_{\text{расчет}}; \quad (14.27)$$

– для поверхности теплообмена, обращенной вниз

$$\bar{\alpha}_{\text{гор}} = 0,7 \cdot \bar{\alpha}_{\text{расчет}}, \quad (14.28)$$

где

$\alpha_{\text{расчет}}$ – коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по одной из формул (14.18), (14.20) или (14.22).

В этом случае *определяющие параметры* в формулах (14.18), (14.20) и (14.22):

а) $R_0 = \min(a, b)$, где a и b – размеры прямоугольной пластины;

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

14.4.1.3. Теплоотдача при свободном движении текучей среды при малых числах Рэлея ($Ra_{m,d} < 1$)

Теплообмен при малых числах Рэлея возникает около тонких проволок и режим течения в этом случае называют *пленочным*. Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при пленочном режиме течения рекомендуют использовать следующие критериальные формулы:

а) по данным Ф.Ф. Цветкова, пленочный режим течения имеет место при числах Рэлея $Ra_{m,d} = 10^{-10} \div 10^{-2}$:

$$\bar{Nu}_{m,d} = 0,675 \cdot Ra_{m,d}^{0,058}; \quad (14.29)$$

б) по данным Л.С. Эйгенсона, пленочный режим течения на тонких нагретых проволоках ($d = 0,2 \div 2$ мм) существует при числах Рэлея $Ra_{m,d} < 1$:

$$\bar{Nu}_{m,d} = 0,5; \quad (14.30)$$

в) по данным М.А. Михеева, пленочный режим существует при числах $Ra_{m,d} < 10^{-3}$ и только в этом случае можно использовать формулу (14.29). В диапазоне $Ra_{m,d} = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$ наблюдается переходный от пленочного к ламинарному режим течения, для которого М.А. Михеев рекомендует формулу

$$\overline{Nu}_{m,d} = 1,18 \cdot Ra_{m,d}^{0,125}; \quad (14.31)$$

Определяющие параметры в формулах (14.29) – (14.31):

- а) $T_0 = T_m = 0,5 \cdot (T_f + T_w)$ – средняя температура пограничного слоя;
 б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр проволоки.

14.4.1.4. Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальных цилиндров (труб) (формула И.М. Михеевой)

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном режиме течения ($Ra_{f,d} = 10^3 \div 10^8$), по данным И.М. Михеевой, равен:

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,5 \cdot Ra_{f,d}^{0,25} \cdot \varepsilon_t; \quad (14.32)$$

Поправку ε_t , учитывающую изменение физических свойств текучей среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (14.10):

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (14.33)$$

Определяющие параметры в формуле (14.32):

- а) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя);
 б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр трубы (цилиндра).

14.4.1.5. Теплоотдача при свободной конвекции около вертикальных пластин, вертикальных труб, горизонтальных пластин, горизонтальных труб и шаров (формула М.А. Михеева)

По данным академика М.А. Михеева, средний коэффициент теплоотдачи при свободном движении текучей среды около указанных тел

$$\overline{Nu}_m = C \cdot Ra_m^n, \quad (14.34)$$

где коэффициенты C и n в зависимости от режима течения приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Значения коэффициентов C и n в формуле (14.34)

| $Ra_m = Gr_m \cdot Pr_m$ | Режим течения | C | n |
|----------------------------------|---|-------|-------|
| $< 10^{-3}$ | Пленочный | 0,5 | 0 |
| $10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$ | Переходный от пленочного к ламинарному | 1,18 | 0,125 |
| $5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$ | Ламинарный и переходный к турбулентному | 0,54 | 0,25 |
| $> 2 \cdot 10^7$ | Турбулентный | 0,135 | 0,333 |

Определяющие параметры в формуле (14.34):

- а) $T_0 = T_m = 0,5 \cdot (T_f + T_w)$ – средняя температура пограничного слоя;

Лекция 14

б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр горизонтальных труб и шаров;

в) $R_0 = h$ – высота вертикальной пластины или высота вертикальной трубы;

г) $R_0 = \min(a,b)$, где a и b – размеры прямоугольной пластины. При этом в зависимости от расположения теплоотдающей (тепловоспринимающей) поверхности коэффициент теплоотдачи либо увеличивают на 30 %, если поверхность теплообмена обращена вверх, либо уменьшают на 30 %, если поверхность теплообмена обращена вниз (см. формулы (14.27) и (14.28)).

14.4.1.6. Теплообмен при свободном движении текучей среды в ограниченном пространстве

Щелевой канал, заполненный текучей средой, в инженерных расчетах моделируют плоской стенкой, через которую теплота передается теплопроводностью и конвекцией.

Учет увеличения теплового потока через щелевой канал за счет движения флюида в щели выполняют введением в расчет *эквивалентного коэффициента теплопроводности*. Поэтому при свободной конвекции в узких щелях, плоских и кольцевых каналах различной формы (рис. 14.3) расчет теплового потока выполняют не по закону теплоотдачи Ньютона, а по формулам стационарной теплопроводности в плоской стенке:

$$q = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{\delta} (T_{w1} - T_{w2}); \quad (14.35)$$

где

$\lambda_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности;

δ – толщина щели или узкого канала;

T_{w1} и T_{w2} – температура на стенках щелевого канала.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности рассчитывают по формуле

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \lambda_f \cdot \varepsilon_k, \quad (14.36)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности текучей среды, который находят в справочных таблицах в зависимости от температуры; ε_k – *коэффициент конвекции* – поправка, учитывающая увеличение теплового потока вследствие свободной конвекции в щели

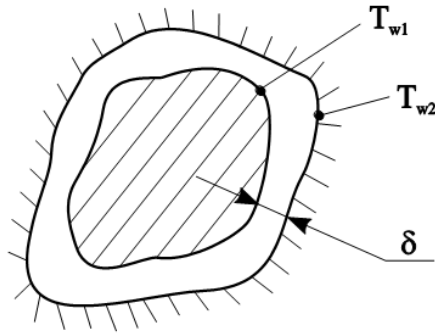


Рис. 14.3. Щелевой канал

Коэффициент конвекции в зависимости от критерия Рэлея определен в результате выполнения многочисленных экспериментов, выполненных по методу теории подобия:

а) при значениях $Ra_f \leq 10^3$

$$\varepsilon_k = 1 ; \quad (14.37)$$

б) при значениях $10^3 < Ra_f < 10^6$

$$\varepsilon_k = 0,105 \cdot Ra_f^{0,3} ; \quad (14.38)$$

в) при значениях $10^6 \leq Ra_f \leq 10^{10}$

$$\varepsilon_k = 0,40 \cdot Ra_f^{0,2} ; \quad (14.39)$$

Из (14.37) видно, что при числах Рэлея $Ra_f \leq 10^3$ теплота через текучую прослойку передается только теплопроводностью и в этом случае эквивалентный коэффициент теплопроводности равен коэффициенту теплопроводности флюида $\lambda_{\text{экв}} = \lambda_f$.

В приближенных расчетах вместо двух уравнений (14.37) и (14.38) для всей области значений аргументов $Ra_f > 10^3$ можно использовать единую зависимость:

$$\varepsilon_k = 0,18 \cdot Ra_f^{0,25} . \quad (14.40)$$

Определяющие параметры в формулах (14.37)–(14.40):

а) $T_0 = T_m = 0,5 \cdot (T_f + T_w)$ – средняя температура пограничного слоя;

б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр горизонтальных труб и шаров;

в) $T_0 = T_m = 0,5 \cdot (T_{w1} + T_{w2})$ – средняя температура текучей среды в щели;

г) $R_0 = \delta$ – ширина щели.