

# Проблемы энерго- и ресурсосбережения

Конвективный теплообмен.  
Свойства жидкостей

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Понятие **конвективного теплообмена** охватывает процесс теплообмена при движении жидкости или газа. При этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Под **конвекцией** теплоты понимают перенос теплоты при перемещении макрочастиц жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция возможна только в текучей среде, в которой перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Если в единицу времени через единицу контрольной поверхности нормально к ней проходит масса жидкости

$$\rho \bar{w},$$

то вместе с ней переносится плотность теплового потока

$$\overline{q_{\text{конв}}} = \rho \bar{w} h$$

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно происходит соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры. В результате конвективный теплообмен описывают уравнением:

$$\overline{q} = \overline{q_{\text{тпр}}} + \overline{q_{\text{конв}}} = -\lambda \nabla t + \rho \overline{wh}$$

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью соприкасающегося с ним тела называется **конвективной теплоотдачей** или просто **теплоотдачей**.

Очень часто в инженерных расчетах определяют теплоотдачу, при этом знание конвективного теплообмена внутри жидкой среды может представлять косвенный интерес, поскольку перенос теплоты внутри жидкости отражается и на теплоотдаче.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

При расчетах теплоотдачи используют **закон Ньютона – Рихмана**:

$$dQ_c = \alpha (t_c - t_{жс}) dF,$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$ , входящий в уравнение, называется коэффициентом теплоотдачи. Он зависит от конкретных условий процесса теплоотдачи, влияющих на его интенсивность.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Коэффициент теплоотдачи определяется:

$$\alpha = \frac{dQ_c}{(t_c - t_{жс})dF} =$$
$$= \frac{q_c}{(t_c - t_{жс})}, \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Таким образом, коэффициент теплоотдачи есть плотность теплового потока  $q$  на границе жидкости (газа) и соприкасающегося тела, отнесенная к разности температур поверхности этого тела и окружающей среды.

В общем случае коэффициент теплоотдачи переменен по поверхности **F**.



# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Если коэффициент теплоотдачи и температура  $t$  не изменяются по  $F$ , то закон Ньютона - Рихмана может быть записан следующим образом:

$$Q_m = \alpha (t_c - t_{жс}) F,$$

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов. В общем случае он является функцией формы и размеров тела, режима движения, скорости и температуры жидкости, физических параметров жидкости и других величин. По-разному протекает процесс теплоотдачи в зависимости от природы возникновения движения жидкости.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Чтобы привести жидкость в движение, к ней необходимо приложить **силу**. Силы, действующие на какой-либо элемент жидкости, можно разделить на **массовые** (или объемные) и **поверхностные**.

Массовыми называют силы, приложенные ко всем частицам жидкости и обусловленные внешними силовыми полями (например, гравитационным или электрическим).

Поверхностные силы возникают вследствие действия окружающей жидкости или твердых тел, они приложены к поверхности контрольного объема жидкости. Такими силами являются силы внешнего давления и силы трения.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Различают **свободную** и **вынужденную** конвекцию.

При свободной конвекции движение в рассматриваемом объеме жидкости возникает за счет неоднородности в ней массовых сил. Если жидкость с неоднородным распределением температуры и, как следствие, с неоднородным распределением плотности находится в поле земного тяготения, может возникнуть свободное гравитационное движение. В дальнейшем в основном будет рассматриваться гравитационная свободная конвекция, вызванная неоднородностью температурного поля.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Вынужденное движение рассматриваемого объема жидкости происходит под действием внешних поверхностных сил, приложенных на его границах, за счет предварительно сообщенной кинетической энергии (например, за счет работы насоса, вентилятора, ветра).

Как вынужденное рассматривается и течение объема жидкости под действием однородного в нем поля массовых сил. (Иллюстрацией может являться течение пленки жидкости по стенке под действием сил тяжести).

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Вынужденное движение в общем случае может сопровождаться свободным движением.

Относительное влияние свободного движения тем больше, чем больше разница температур отдельных частиц среды и чем меньше скорость вынужденного движения.

При больших скоростях вынужденного движения влияние свободной конвекции становится пренебрежимо малым.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЧЕНИЯ О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

В дальнейшем в основном будут рассмотрены **стационарные** процессы течения и теплоотдачи. Условием стационарности является неизменность во времени скорости и температуры в любой точке жидкости (газа).

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

В зависимости от физических свойств жидкостей (газов) процесс теплообмена может протекать различно. Особенно большое влияние оказывают коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность, коэффициент температуропроводности, а также коэффициент вязкости  $\mu$  .



# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Для каждого вещества эти величины имеют определенные значения и являются функцией параметров состояния (температуры, давления). Особенно существенные изменения физических свойств могут иметь место в околоскритической области термодинамических состояний в области очень низких температур. Будут рассматриваться процессы при монотонных и не слишком значительных изменениях физических свойств определенного вещества. Теплообмен в околоскритической области рассматривать не будем.

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

При теоретическом анализе конвективного теплообмена будем считать, что физические свойства жидкости (газа) постоянны в исследуемом интервале температур.

Все реальные жидкости обладают вязкостью. Между частицами или слоями, движущимися с различными скоростями, возникает сила внутреннего трения, противодействующая движению.

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Согласно **закону Ньютона** эта касательная сила  **$s$** , отнесенная к единице поверхности, которая действует в любой точке потока в плоскости, ориентированной по течению, пропорциональна изменению скорости в направлении нормали к этой плоскости:

$$s = \mu \frac{dw}{dn}$$

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Коэффициент  $\mu$  называется **динамическим коэффициентом вязкости** или просто коэффициентом вязкости. Он измеряется в Па•с.

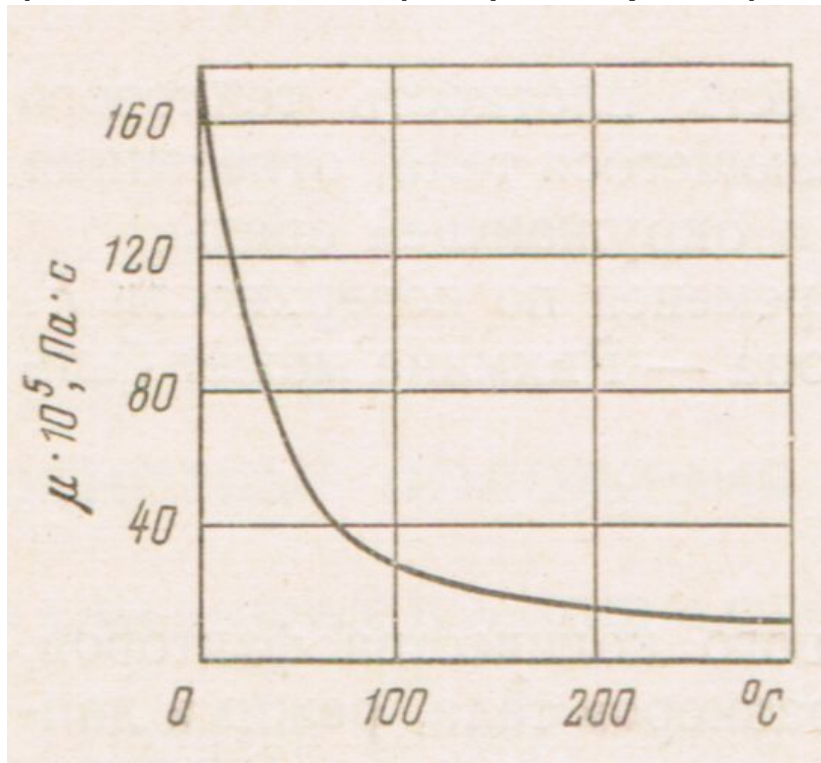
В уравнения гидродинамики и теплопередачи часто входит отношение коэффициента вязкости к плотности, называемое **кинематическим коэффициентом вязкости** и обозначаемое буквой  $\nu$ :

$$\nu = \mu / \rho, \text{ м}^2 / \text{с}$$

Эти коэффициенты являются физическими параметрами. Они существенно зависят от температуры.

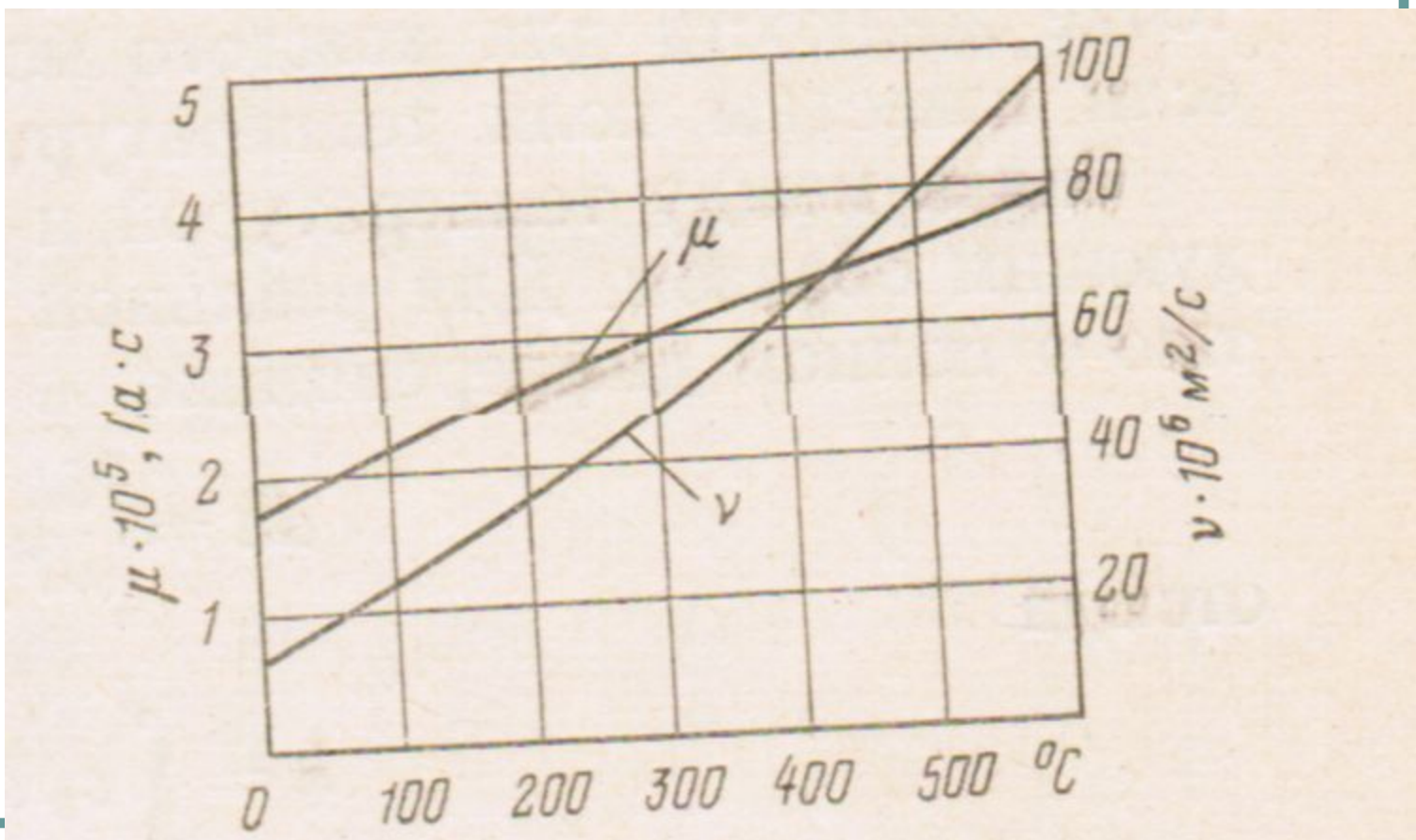
# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

У капельных жидкостей вязкость почти не зависит от давления, но значительно уменьшается при повышении температуры. Типичный характер функции  $\mu = f(t)$  для капельных жидкостей представлен на рисунке (на примере воды):



# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

У газов оба коэффициента увеличиваются при повышении температуры. На рисунке зависимость показана на примере воздуха:



# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Кинематическая вязкость капельных жидкостей уменьшается при повышении температуры почти в такой же степени, как и  $\mu$ , так как плотность слабо зависит от температуры. У газов, плотность которых при повышении температуры сильно уменьшается, кинематическая вязкость при увеличении температуры быстро повышается.

При течении жидкости или газа, обладающих вязкостью, наличие внутреннего трения приводит к процессу **диссипации** (рассеяния) энергии. Часть кинетической энергии движущейся жидкости необратимо переходит в теплоту и вызывает нагревание жидкости. Если вязкость жидкости или ее скорость невелики, то нагревание будет незначительным. (В дальнейшем будем рассматривать такие процессы).

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

На теплоотдачу оказывает влияние сжимаемость жидкостей. **Изотермической сжимаемостью** или **коэффициентом сжатия** тела при  $t = \text{const}$  называют величину  $\varepsilon$  представляющую собой относительное изменение плотности вещества при изменении давления:

$$\varepsilon = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_t$$



# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Для капельных жидкостей изотермическая сжимаемость мала. Так, например, для воды порядка  $5 \cdot 10^{-10} 1/Па$  т. е. повышение давления на 0,1 МПа вызывает относительное изменение плотности на 1/20 000.

Для воздуха в нормальном состоянии  $\varepsilon = 10^{-5} 1/Па$

Таким образом, сжимаемость воздуха в 20 000 раз больше сжимаемости воды. Аналогичное соотношение имеет место и для других газов.

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

В дальнейшем будет рассматриваться теплоотдача **несжимаемой** жидкости. При этом слово «жидкость» будет употребляться как собирательное понятие и для жидкостей, и для газов.

Между сжимаемыми и несжимаемыми газами нет резкой границы. Обычно считают, что если скорость газа меньше четвертой части скорости звука, то к газам допустимо применять законы движения и теплоотдачи, полученные для несжимаемой жидкости.

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Для конвективного теплообмена большое значение имеет тепловое расширение жидкости, которое характеризуется **температурным коэффициентом объемного расширения**, определяемым уравнением ( $p = \text{const}$ ):

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_p, 1 / K$$

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

**Таким образом, температурный коэффициент объемного расширения представляет собой относительное изменение объема при изменении температуры на один Кельвин (1градус) при постоянном давлении.**

Для жидкостей температурный коэффициент объемного расширения мал (кроме области вблизи критической точки). Для идеального газа температурный коэффициент объемного расширения есть величина, обратная абсолютной температуре газа:

$$\beta = \frac{1}{T}, 1 / K$$

# Вопросы к экзамену

1. Основные положения учения о конвекции и конвективном теплообмене. Вектор плотности теплового потока. Закон Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Массовые и поверхностные силы. Свободная и вынужденная конвекция.
2. Физические свойства жидкости (динамический и кинематический коэффициент вязкости, изотермическая сжимаемость, температурный коэффициент объемного расширения).