

Тепломассообмен 9

Конвекция:
Общие сведения

Конвективный теплообмен в однородной среде

Конвективный теплообмен – это совместный перенос теплоты теплопроводностью и конвекцией. Конвекция может иметь место в жидкостях, газах и расплавленных металлах.

Плотность конвективного теплового потока определяется по уравнению Ньютона–Рихмана, Вт/м²:

$$q = \alpha(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}) = \alpha\theta,$$

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м²К;

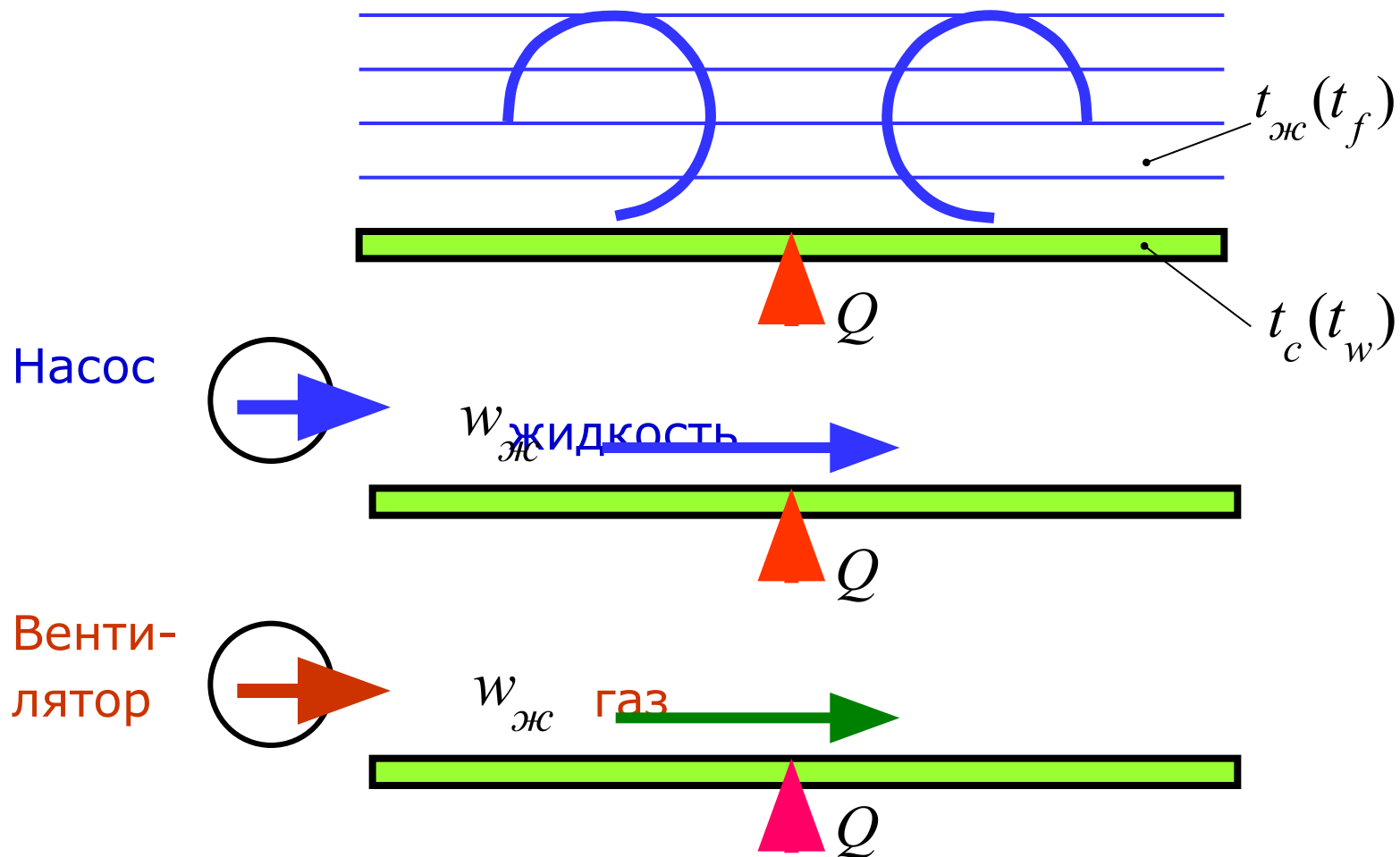
$t_{\text{ст}}, t_{\text{ж}}$ – температуры стенки и жидкости, °С;

θ – разность температур между стенкой и жидкостью, К.

Различают свободную (естественную) конвекцию – движение жидкости из-за разности плотностей ее нагретых и холодных слоев и вынужденную – под воздействием внешних сил (насоса – для жидкостей, вентилятора или компрессора – для газов).

Конвекция (от лат. convectiō — «перенесение») — вид теплообмена, при котором внутренняя энергия передается струями и потоками.

Свободная (естественная) и вынужденная конвекции



Физические свойства жидкостей

В качестве теплоносителей в настоящее время применяют воздух и другие газы, воду, масла, спирты, жидкие металлы.

Процесс теплоотдачи при этом существенно зависит от физических свойств теплоносителя. К ним относятся:

λ - теплопроводность, Вт/(мК);

ρ - плотность, кг/м³;

c - массовая теплоемкость, Дж/(кгК);

$a = \lambda / (\rho c)$ - коэффициент температуропроводности, м²/с.

Из-за вязкости жидкости, между ее слоями, движущимися с разной скоростью, возникает трение. Согласно

закону Ньютона касательная сила трения, Н/м²:

$$s = \mu \left(\frac{dw}{dn} \right),$$

Вязкость жидкости

где μ — коэффициент динамической вязкости, размерность которого из предыдущей формулы:

$$\mu = \frac{H \cdot c}{(dw/dn) \cdot m^2} = \frac{Hc}{m^2} = \frac{Hc}{m^2}.$$

Наряду с динамической вязкостью жидкости, часто используется

коэффициент кинематической вязкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{Hc \cdot m^3}{m^2 \cdot kg} = \frac{kg \cdot m \cdot c}{c^2 \cdot m^2 \cdot kg} = \frac{m^2}{c}.$$

До введения международной системы единиц «СИ» кинематическая вязкость измерялась в Стоксах и сантиСтоксах: $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

На преодоление вязкостных сил расходуется часть кинетической энергии жидкости, которая переходит в тепловую энергию (диссипация энергии). С увеличением скорости жидкости диссипация энергии возрастает.

Коэффициент объемного (температурного) расширения жидкости

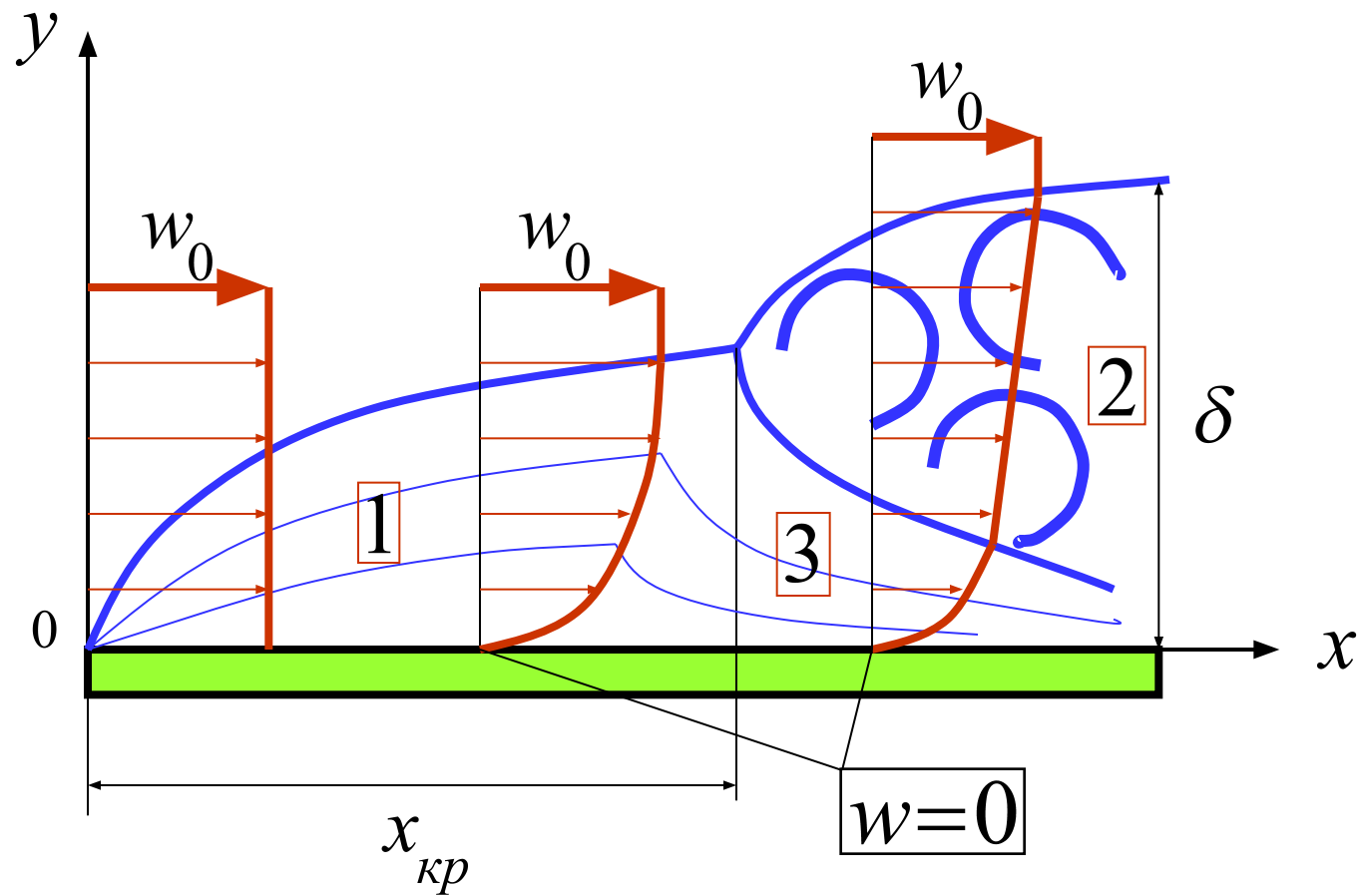
При свободной (естественной) конвекции существенное значение имеет коэффициент объемного (температурного) расширения жидкости, 1/К:

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)_{p=Const},$$

то есть относительное изменение объема жидкости при увеличении ее температуры на 1 К. Для разных жидкостей значение β приводится в справочных таблицах. Для идеальных газов его можно определить по формуле:

$$\beta = \frac{1}{T}.$$

Гидродинамический пограничный слой



Определение гидродинамического пограничного слоя

Гидродинамический пограничный слой – это тонкий слой жидкости у поверхности, в котором скорость изменяется от 0 на поверхности (условие прилипания) до w_0 на границе.

На предыдущем слайде при:

$x=0 \rightarrow w = w_0 = \text{«невозмущенная» жидкость;}$

$x \leq x_{кр} \rightarrow$ ламинарный пограничный слой (зона 1);

$x > x_{кр} \rightarrow$ турбулентный пограничный слой (зона 2);

$x > x_{кр} \rightarrow$ ламинарный подслой (зона 3).

При движении жидкости в трубах $x_{кр} = (2 \dots 20)d$,
меньшие значения относятся к шероховатым трубам,
а большие - к гладким.

Режимы движения жидкости

Конвективная теплоотдача существенно зависит от режима движения жидкости (ламинарный, турбулентный). При ламинарном (слоистом) движении слои жидкости не перемешиваются, поэтому теплота передается от слоя к слою теплопроводностью.

При турбулентном движении к теплопроводности добавляется конвекция. Доля теплопереноса конвекцией возрастает с увеличением скорости жидкости.

Внутри пограничного слоя движение жидкости ламинарное, поэтому его называют ламинарным пограничным слоем, за пределами пограничного слоя – движение турбулентное (вихревое). Так как скорость жидкости в пограничном слое изменяется плавно и асимптотически приближается к w_0 на границе слоя, то его толщину трудно определить.

Гидродинамический пограничный слой

Толщиной пограничного слоя принято считать такое расстояние от поверхности, на котором скорость жидкости w будет отличаться от скорости w_0 на заранее заданную величину, например, на 1 %.

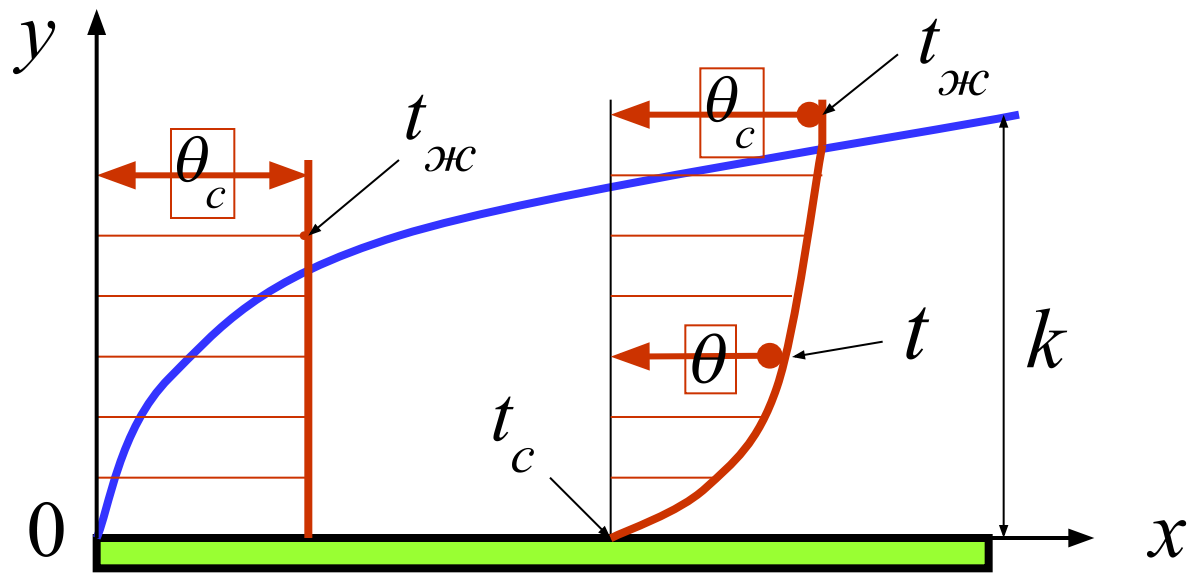
В пограничном слое может быть и турбулентное движение.

При некотором критическом расстоянии $x_{кр}$ толщина пограничного слоя возрастает до такой величины, при которой слой становится неустойчивым и движение в нем «срывается» в турбулентное (турбулентный пограничный слой).

Но и в турбулентном пограничном слое есть очень тонкий ламинарный подслой, в котором движение ламинарное.

Тепловой пограничный слой

По аналогии с гидродинамическим пограничным слоем Кружилин ввел понятие **теплого пограничного слоя**, как тонкого слоя жидкости у поверхности, в котором ее температура изменяется от t_c на стенке до $t_{ж}$ в ядре потока.



Толщина теплового пограничного слоя

Толщина теплового пограничного слоя - « k ».

Внутри теплового пограничного слоя справедливо условие $(\partial t / \partial y) = 0$; $\rightarrow t = t_{\text{жс}}$.

В общем случае толщины гидродинамического и теплового пограничных слоев разные ($\delta \neq k$).

В ламинарном пограничном слое теплота передается теплопроводностью, поэтому он составляет основное термическое сопротивление переносу теплоты от стенки к жидкости.

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{ст}} - t_{\text{жс}}).$$

Из этого выражения видно, что чем больше толщина пограничного слоя, тем меньше переданная теплота, то есть надо стремиться разрушить пограничный слой.