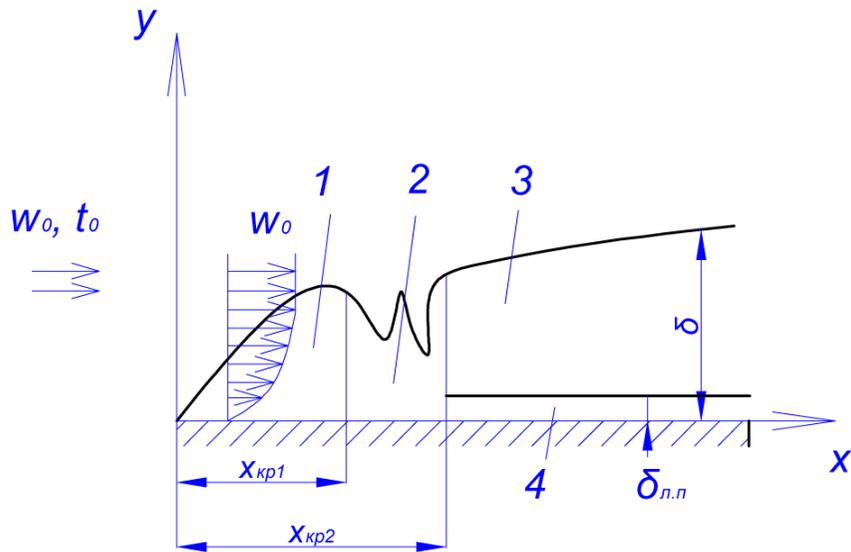


# **Теплообмен при вынужденном движении жидкости вдоль пластины**



Если плоская поверхность пластины омывается потоком с равномерным распределением скоростей, то, начиная от передней кромки пластины, на ней образуется *гидродинамический пограничный слой*.

В нём вследствие трения скорость жидкости изменяется от скорости,

равной скорости невозмущенного потока, до нуля.

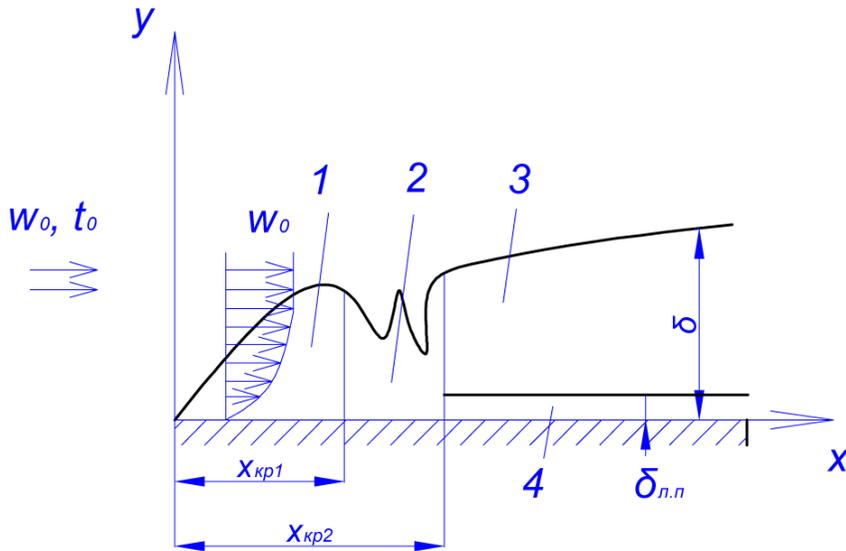
Течение жидкости в пограничном слое может быть как ламинарным, так и турбулентным.

При наличии разности температур между потоком жидкости и поверхностью пластины, кроме гидродинамического, образуется также и *тепловой пограничный слой*.

В пределах теплового пограничного слоя температура жидкости изменяется от температуры потока вдали от пластины  $t_0$  до температуры, равной температуре поверхности пластины  $t_{cm}$ .

О режиме течения в пограничном слое судят по величине числа Рейнольдса.

Опыты показывают, что при течении вдоль пластины наблюдается широкая область переходного режима течения, находящаяся между  $Re_{ж,l} = 10^4 \div 4 \cdot 10^6$ .



(индексы «ж» и «/» означают, что физические параметры для  $Re$  берут по температуре жидкости, а характерный размер – длина пластины по направлению потока).

Коэффициент теплоотдачи зависит от:

- изменения характера течения (ламинарного или турбулентного),
- рода жидкости, её температуры,
- температурного напора (между поверхностью и жидкостью),
- направления теплового потока (к стенке или от неё),
- изменения вязкости жидкости в пограничном слое,
- естественной конвекции.

Большое количество факторов, влияющих на теплоотдачу, привело к тому, что отрезок  $(x_{кр2} - x_{кр1})$  заменяют точкой и считают, что для пластины  $Re_{кр} = 5 \cdot 10^5$ .

Т.о., ламинарный режим течения в пограничном слое имеет место при  $Re_{ж,l} < 5 \cdot 10^5$ .

Толщину гидродинамического подслоя на расстоянии  $x$  от кромки пластины определяют как:

$$d = \frac{4,64 \cdot x}{\text{Re}_x^{0,5}}$$

Толщину теплового подслоя на расстоянии  $x$  от кромки пластины определяют как:

$$k = \frac{4,64 \cdot x}{\text{Re}_x^{0,5} \text{Pr}^{0,33}}$$

Для определения коэффициента теплоотдачи пластины, омываемой продольным потоком жидкости при ламинарном режиме в пограничном слое, можно рекомендовать следующие приближенные формулы при значениях чисел  $Re_{ж,x} < 10^4$

$$Nu_{ж,x} = 0,33 Re_{ж,x}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \left( Pr_{ж} / Pr_{ст} \right)^{0,25}$$

где  $Nu_{ж,x} = \frac{ax}{l_{ж}}$ ;  $Re_{ж,x} = \frac{W_0 x}{n_{ж}}$ ;  $Pr_{ж} = \frac{n_{ж}}{a_{ж}}$ ;  $Pr_{ст} = \frac{n_{ст}}{a_{ст}}$

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи:

$$\overline{Nu}_{ж,l} = 0,67 Re_{ж,l}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \left( Pr_{ж} / Pr_{ст} \right)^{0,25}$$

Для воздуха при  $Re_{ж,x} < 10^4$  формула упрощается

$$\overline{Nu}_{ж,l} = 0,6 Re_{ж,l}^{0,5}$$

за определяющую температуру принята температура набегающего потока вдали от стенки ( $Pr_{cm}$  берется по температуре стенки);  
за определяющую скорость – скорость набегающего потока;  
за определяющий размер – длина пластины по направлению потока.

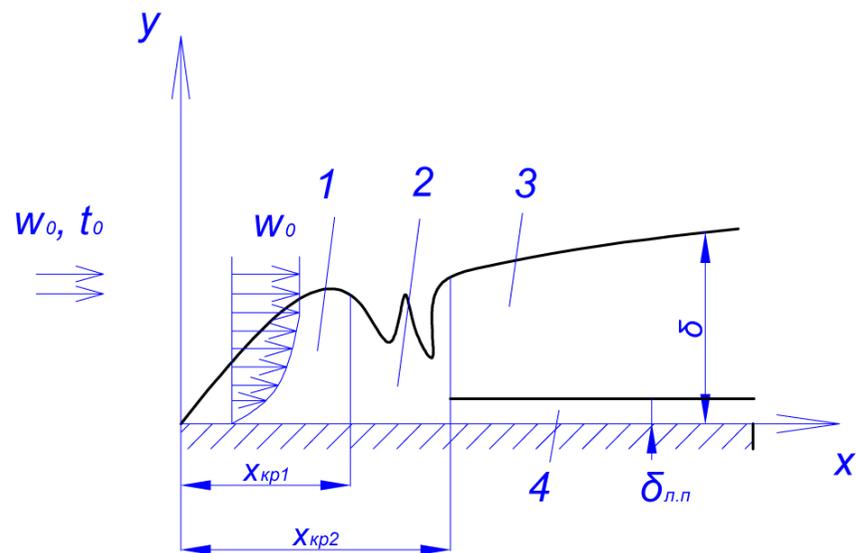
Влияние естественной конвекции на теплоотдачу в этих формулах не учитывается.

Для одной и той же жидкости при  $t_0 = \text{const}$  и  $\text{Re} = \text{const}$  интенсивность теплоотдачи зависит и от направления теплового потока, т.е. от того, нагревается или охлаждается данная жидкость. Т.к. физические константы выбираются по  $\bar{t}$ , то для жидкости и стенки в случаях нагревания и охлаждения они будут различны.

Предложено зависимость теплоотдачи жидкости от направления теплового потока учитывать путём введения в уравнения множителя  $(Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25}$ .

Индексы указывают, при какой температуре нужно брать величины  $\nu$  и  $a$  – жидкости вдали от стенки или по температуре стенки.

При нагревании жидкости  $(Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25} > 1$ , при охлаждении – наоборот.



При турбулентном гидродинамическом пограничном слое у поверхности пластины образуется тонкий слой ламинарно текущей жидкости, называемый ламинарным подслоем, в котором происходит основное изменение скорости потока. Также в ламинарном подслое происходят почти все изменения

температуры текущей жидкости.

Для определения коэффициента теплоотдачи капельных жидкостей при турбулентном пограничном слое у поверхности пластины рекомендуется при значениях критерия  $Re_{ж,l} > 4 \cdot 10^6$  следующее уравнение

$$Nu_{ж,x} = 0,0296 Re_{ж,x}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left( Pr_{ж} / Pr_{ст} \right)^{0,25}$$
$$\overline{Nu}_{ж,l} = 0,037 Re_{ж,l}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left( Pr_{ж} / Pr_{ст} \right)^{0,25}$$

Для воздуха при  $Pr \approx 0,7$  уравнение упрощается и принимает вид

$$\overline{Nu}_{ж,l} = 0,032 Re_{ж,l}^{0,8}$$

за определяющую температуру в уравнениях принята температура жидкости вдали от пластины;

за определяющий размер берется длина пластины по направлению потока.

Толщину гидродинамического подслоя на расстоянии  $x$  от кромки пластины определяют как:

$$d = \frac{0,37 \cdot x}{\text{Re}_x^{0,2}}$$

Опыты показывают, что при развитом турбулентном течении жидкости теплоотдача не зависит от числа  $Gr$  и, следовательно, в передаче всего количества теплоты принимает участие не естественная, а вынужденная конвекция.