

Теплотехника

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Жидкие и газообразные теплоносители нагреваются или охлаждаются при соприкосновении с поверхностями твердых тел.

Например, дымовые газы в печах отдают теплоту нагреваемым заготовкам, а в паровых котлах — трубам, внутри которых греется или кипит вода; воздух в комнате греется от горячих приборов отопления и т. п.

Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и жидкостью называется **теплоотдачей**, а поверхность тела, через которую переносится теплота, - **поверхностью теплообмена** или **теплоотдающей поверхностью**

Закон Ньютона-Рихмана

Согласно закону Ньютона-Рихмана тепловой поток в процессе теплоотдачи пропорционален площади поверхности теплообмена F и разности температур поверхности t_c и жидкости $t_{ж}$:

$$Q = \alpha F (t_{ст} - t_{ж})$$

В процессе теплоотдачи независимо от направления теплового потока Q (от стенки к жидкости или наоборот) значение его принято считать положительным, поэтому разность $t_c - t_{ж}$ берут по абсолютной величине.

Закон Ньютона-Рихмана

Коэффициент пропорциональности α , $Вт / (м^2 \cdot К)$ называется **коэффициентом теплоотдачи**.

Он характеризует интенсивность процесса теплоотдачи. Численное значение его равно тепловому потоку от единичной поверхности теплообмена при разности температур поверхности и жидкости в 1 К.

Закон Ньютона-Рихмана

Коэффициент теплоотдачи обычно определяют экспериментально, измеряя тепловой поток Q и разность температур в процессе теплоотдачи от поверхности известной площади F .

При проектировании аппаратов (проведении тепловых расчетов) по формуле Ньютона-Рихмана определяют одно из значений Q , F или разность температур. При этом коэффициент теплоотдачи находят по результатам обобщения ранее проведенных экспериментов.

Закон Ньютона-Рихмана

Коэффициент теплоотдачи зависит от физических свойств жидкости и характера ее движения. Различают естественное и вынужденное движение (конвекцию) жидкости.

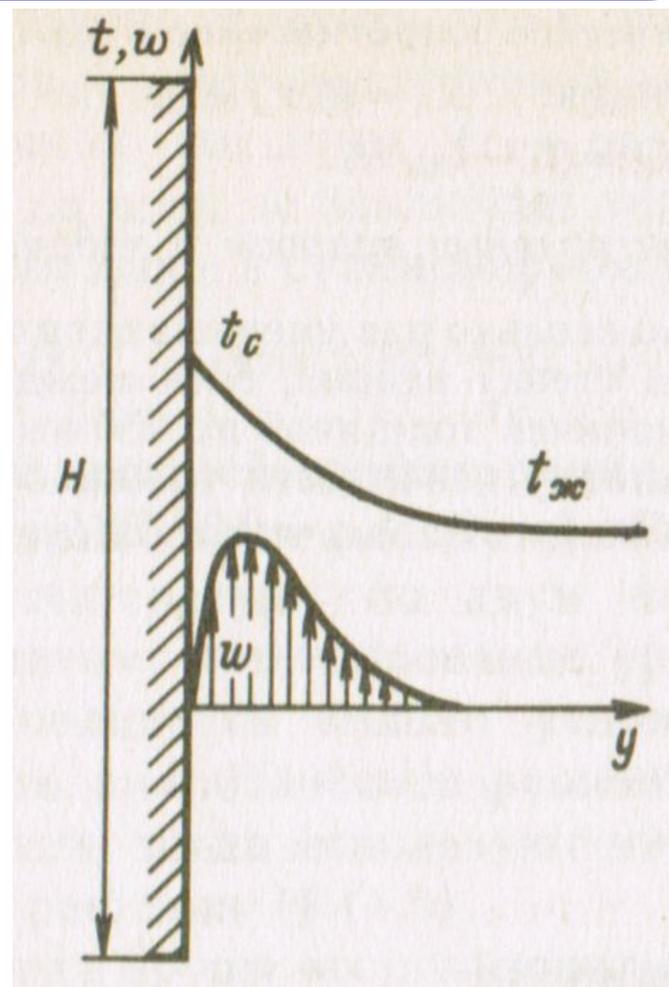
Вынужденное движение создается внешним источником (насосом, вентилятором, ветром).

Естественная конвекция возникает за счет теплового расширения жидкости, нагретой около теплоотдающей поверхности в самом процессе теплообмена. Она будет тем сильнее, чем больше разность температур $t_c - t_{ж}$ и температурный коэффициент объемного расширения:

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_{\rho = const}$$

Закон Ньютона-Рихмана

Распределение скоростей
и температур теплоносителя
около вертикальной
теплоотдающей поверхности
при естественной конвекции



Закон Ньютона-Рихмана

Для газов, которые в большинстве случаев приближенно можно считать идеальными, коэффициент объемного расширения можно вычислять по формуле:

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

Закон Ньютона-Рихмана

Подъемная сила перемещает прогретую жидкость вверх без каких-либо побуждающих устройств (возникает естественная конвекция).

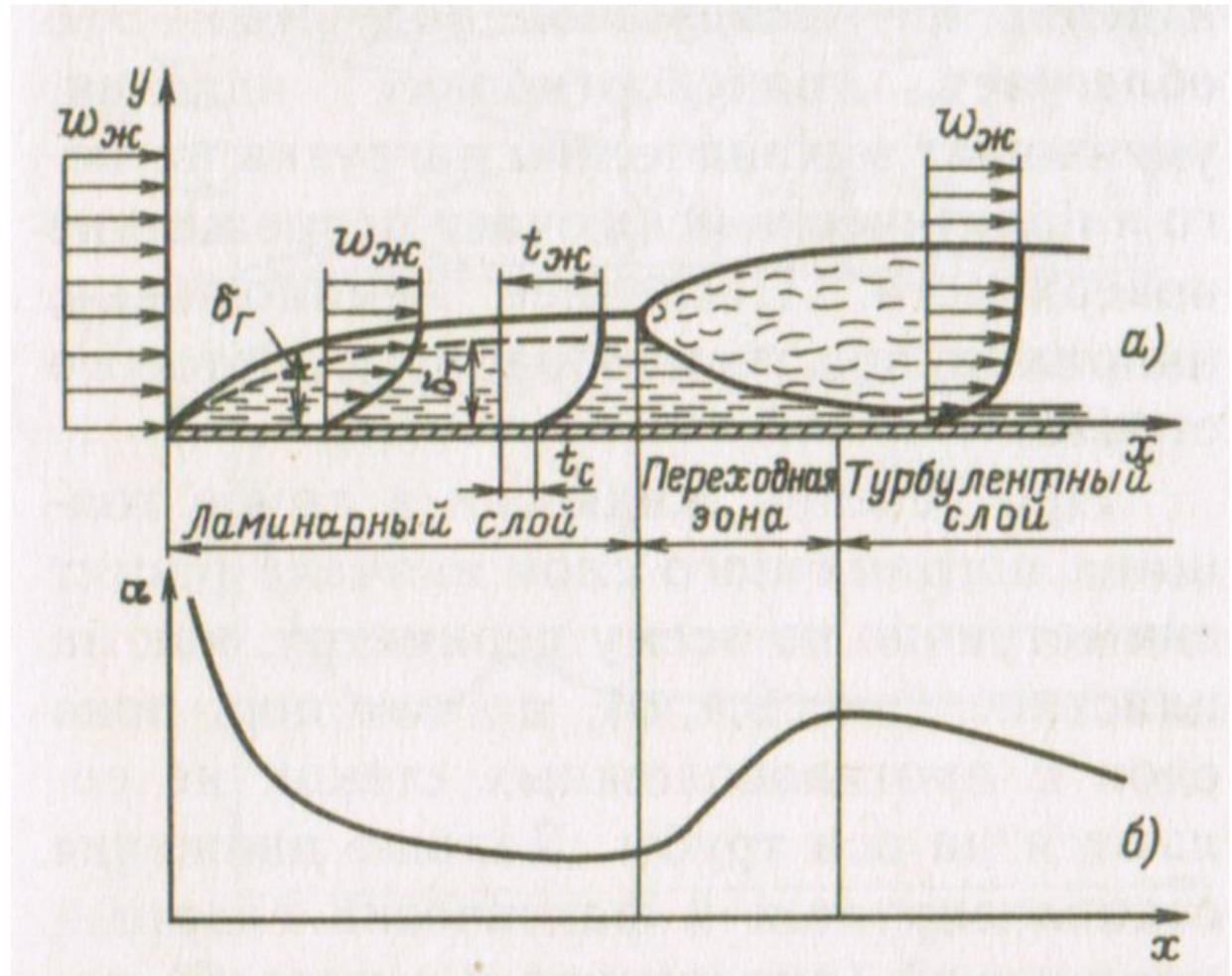
Все рассуждения о возникновении естественной конвекции справедливы и для случая охлаждения жидкости с той разницей, что жидкость около холодной поверхности будет двигаться вниз, поскольку ее плотность будет больше, чем вдали от поверхности.

Закон Ньютона-Рихмана

Из-за вязкого трения течение жидкости около поверхности затормаживается, поэтому, несмотря на то что наибольший прогрев жидкости, а соответственно и подъемная сила при естественной конвекции будут около теплоотдающей поверхности, скорость движения частиц жидкости, прилипших к самой поверхности, равна нулю.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Продольное
обтекание
тонкой
пластины



ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

На рисунке показано образование пограничного слоя (а) и распределение местного (локального) коэффициента теплоотдачи (б) при продольном обтекании тонкой пластины.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Частицы жидкости, непосредственно соприкасающиеся с поверхностью, адсорбируются («прилипают») к ней. Соприкасаясь с неподвижным слоем, тормозятся и более удаленные от поверхности слои жидкости. Зона потока, в которой наблюдается уменьшение скорости ($w < w_{ж}$), вызванное вязким взаимодействием жидкости с поверхностью, называется **гидродинамическим пограничным слоем**.

За пределами пограничного слоя течет невозмущенный поток. Четкой границы между ними нет, т.к. скорость w по мере удаления от поверхности постепенно (асимптотически) возрастает до $w_{ж}$.

Практически за толщину гидродинамического пограничного слоя условно принимают расстояние от поверхности до точки, в которой скорость w отличается от скорости невозмущенного потока $w_{ж}$, незначительно (обычно на 1 %).

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

На начальном участке гидродинамический слой очень тонок и течение в нем **ламинарное** — струйки жидкости движутся параллельно, не перемешиваясь. При удалении от лобовой точки толщина пограничного слоя растет. На некотором расстоянии $x = x_{кр}$ ламинарное течение становится неустойчивым. В пограничном слое появляются вихри (турбулентные пульсации скорости).

Постепенно **турбулентный** режим течения распространяется почти на всю толщину гидродинамического пограничного слоя. Лишь около самой поверхности пластины в турбулентном пограничном слое сохраняется тонкий ламинарный, или вязкий, подслой, где скорость невелика и силы вязкости гасят турбулентные вихри.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Тепловое взаимодействие потока с пластиной.

Частицы жидкости, «прилипшие» к поверхности, имеют температуру, равную температуре поверхности. Соприкасающиеся с этими частицами движущиеся слои жидкости охлаждаются, отдавая им свою теплоту. От соприкосновения с этими слоями охлаждаются следующие более удаленные от поверхности слои потока.

Так формируется **тепловой пограничный слой**, в пределах которого температура меняется от t_c на поверхности до $t_{ж}$ в невозмущенном потоке.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

По аналогии с гидродинамическим пограничным слоем толщина теплового пограничного слоя принимается равной расстоянию от поверхности до точки, в которой избыточная температура жидкости отличается от избыточной температуры невозмущенного потока на малую величину (обычно на 1 %).

С удалением от лобовой точки количество охлаждающейся у пластины жидкости увеличивается, и толщина теплового пограничного слоя возрастает.

В общем случае толщины теплового и гидродинамического слоев не равны. но часто достаточно близки друг к другу, особенно в газах.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

При ламинарном течении тепловой поток от охлаждающейся в пограничном слое жидкости переносится к поверхности пластины только за счет теплопроводности.

При этом плотность теплового потока по толщине пограничного слоя неодинакова: на внешней границе он равен 0, т.к. дальше жидкость не охлаждается. По мере приближения к поверхности значение q возрастает.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

С увеличением толщины теплового пограничного слоя при ламинарном течении жидкости у поверхности пластины интенсивность теплоотдачи уменьшается.

В переходной зоне общая толщина пограничного слоя продолжает возрастать, однако значение коэффициента теплоотдачи при этом увеличивается, т.к. толщина ламинарного подслоя убывает, а в образующемся турбулентном слое теплота переносится не только теплопроводностью, но и конвекцией вместе с перемещающейся массой, т. е. более интенсивно. В результате суммарное термическое сопротивление теплоотдачи убывает.

После стабилизации толщины ламинарного подслоя в зоне развитого турбулентного режима коэффициент теплоотдачи вновь начинает убывать из-за возрастания общей толщины пограничного слоя.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

При течении жидкости в трубе толщина пограничного слоя вначале растёт симметрично по всему периметру, как на пластине, до тех пор, пока слои с противоположных стенок не сольются на оси трубы.

Дальше движение стабилизируется и фактически гидродинамический (аналогично и тепловой) пограничный слой заполняет все сечение трубы.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Чтобы получить аналитическое выражение для коэффициента теплоотдачи, необходимо интегрировать систему дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости и перенос теплоты в ней.

Даже при существенных упрощениях это возможно лишь в отдельных случаях при ламинарном течении жидкости, поэтому обычно для получения расчетных зависимостей прибегают к экспериментальному изучению явления.

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

Основная трудность, возникающая при экспериментальном исследовании конвективного теплообмена, заключается в том, что коэффициент теплоотдачи зависит от многих параметров.

Например, средний по поверхности коэффициент теплоотдачи от продольно омываемой пластины зависит от длины пластины, скорости набегающего потока и теплофизических параметров жидкости.

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

Согласно основной теореме метода анализа размерностей (π -теореме) зависимость между N размерными величинами, определяющими данный процесс, может быть представлена в виде зависимости между составленными из них K безразмерными величинами, где K - число первичных переменных с независимыми размерностями, которые не могут быть получены друг из друга.

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

Каждый из безразмерных параметров имеет определенный физический смысл. Их принято обозначать первыми буквами фамилий ученых, внесших существенный вклад в изучение процессов теплопереноса и гидродинамики, и называть в честь этих ученых.

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

Число Нуссельта (1887—1957 г.):
представляет собой безразмерный
коэффициент теплоотдачи:

$$\overline{Nu} = \overline{\alpha l} / \lambda$$

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

Число Рейнольдса (1842—1912):

выражает отношение сил инерции (скоростного напора) к силам вязкого трения:

$$Re = w_{ж} l / \nu$$

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

При малых Re силы вязкости и режим течения жидкости ламинарной (отдельные струи потока не перемешиваются, двигаясь параллельно друг другу, и всякие случайные завихрения быстро затухают под действием сил вязкости).

При турбулентном течении в потоке преобладают силы инерции, поэтому завихрения интенсивно развиваются.

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

Число Прандтля (1875-1953) состоит из величин, характеризующих теплофизические свойства вещества и по существу само является теплофизической константой вещества (значение приводится в справочниках):

$$Pr = c\rho\nu / \lambda = \nu / a$$

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

При естественной конвекции скорость жидкости вдали от поверхности равна 0. На теплоотдачу будет влиять подъемная сила. В этом случае используют **число Грасгофа**. Оно характеризует отношение подъемной силы, возникающей вследствие теплового расширения жидкости, к силам вязкости.

$$Gr = g \beta (t_c - t_{жс}) l^3 / \nu^2$$

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

При исследовании локального теплообмена кроме безразмерных чисел в уравнения войдут безразмерные координаты, представляющие собой отношение обычных координат к определяющему размеру.

(Для продольно омываемой пластины это будет $X = x/l$).

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Продольное обтекание пластины.

Локальный коэффициент теплоотдачи (на расстоянии $X = x/l$ от начала пластины) при ламинарном течении теплоносителя в пограничном слое (индекс ж означает «при температуре жидкости», индекс с – «при температуре стенки»):

$$Nu_{ж} = 0,33 X^{-0.5} Re_{ж}^{0.5} Pr_{ж}^{0,33} \left(Pr_{ж} / Pr_c \right)^{0,25},$$

$$Re_{ж} \leq 5 \cdot 10^5, 0,6 \leq Pr_{ж} \leq 15$$

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Продольное обтекание пластины.

Локальный коэффициент теплоотдачи (на расстоянии $X = x/l$ от начала пластины) при турбулентном течении теплоносителя в пограничном слое:

$$Nu_{ж} = 0,03 X^{-0.2} Re_{ж}^{0.8} Pr_{ж}^{0,43} \left(Pr_{ж} / Pr_c \right)^{0,25}$$

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Продольное обтекание пластины.

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном течении теплоносителя в пограничном слое:

$$\overline{Nu}_{жс} = 0,66 Re_{жс}^{0,5} Pr_{жс}^{0,33} \left(Pr_{жс} / Pr_c \right)^{0,25}$$

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Продольное обтекание пластины.

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении теплоносителя в пограничном слое:

$$\overline{Nu}_{жс} = 0,037 Re_{жс}^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} \left(Pr_{жс} / Pr_c \right)^{0,25}$$

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Поперечное обтекание одиночной трубы

(C, n берутся из таблиц в зависимости от $Re_{ж}$)

$$\overline{Nu}_{ж} = \left(0,43 + C Re_{ж}^n Pr_{ж}^{0,38} \right) \varepsilon_{\varphi}$$

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Поперечное обтекание пучка труб

(Для шахматных пучков $C=0,41, n=0,6$; для коридорных – $C=0,26, n=0,65$)

$$\overline{Nu}_{жс} = C Re_{жс}^n Pr_{жс}^{0,33} \left(Pr_{жс} / Pr_c \right)^{0,25} \varepsilon_{\varphi} \varepsilon_s$$

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Течение теплоносителя внутри труб при турбулентном режиме

$$Nu_{жс} = 0,021 Re_{жс}^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} \left(Pr_{жс} / Pr_c \right)^{0,25},$$

$$Re_{жс} = 10^4 \div 5 \cdot 10^6, Pr = 0,6 \div 2500$$

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Для расчета коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции обычно пользуются зависимостью вида

$$\overline{Nu}_{жс} = B \left(Gr_{жс} Pr_{жс} \right)^n \left(Pr_{жс} / Pr_c \right)^{0,25}$$

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Для труб и шаров определяющим линейным размером, входящим в безразмерные числа, является диаметр d ; для вертикальных труб большого диаметра и пластин - высота H .

Если значение коэффициента B увеличить на 30 % по сравнению с приведенным, то формулой можно пользоваться и для расчета теплоотдачи от горизонтальной плиты, обращенной греющей стороной вверх.

Если греющая сторона обращена вниз, то значение B следует уменьшить на 30 %. В обоих случаях определяющим является наименьший размер плиты в плане.