ФБОУ ВПО
«Астраханский Государственный Технический Университет»

Кафедра «Теплоэнергетика»

Лекция №6
На тему:
«Конвективный теплообмен, Критерии подобия»

Конвективный теплообмен.

Основные понятия и определения.

Конвекция - перемещение в пространстве неравномерно нагретых объёмов жидкости или газов.

Обычно при инженерных расчётах определяется конвективный теплообмен между жидкой и твёрдой стенкой - теплоотдача. По закону Ньютона - Рихтана, тепловой поток **Q** от стенки и жидкости равен: $\mathbf{Q = \alpha F (t_c - t_ж)}$

Главная трудность расчёта заключается в определении **α**, зависящего от ряда факторов:

1) от физических свойств омывающей поверхность жидкости (плотность **ρ**, вязкость (**ν** - кинематическая, **μ** - динамич.) теплоёмкость **Cp**, теплопроводность **λ**);
2) от формы и размеров поверхности;
3) от природы возникновения движения среды;
4) от скорости движения.

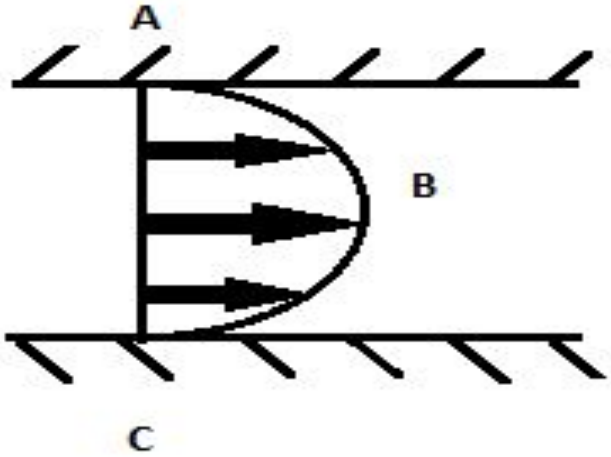
По природе возникновения различают 2 вида движения:

1. Свободное - происходит из-за разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости, находящиеся в поле действия сил тяжести; оно наз. так же естественной конвекцией и зависит от рода ж., разности **t°C**, объёма пространства, в котором происходит процесс.
2. Вынужденное - возникает под действием посторонних побудителей (насоса, вентилятора, ветра). Наряду с вынужденным движением одновременно может развиваться и свободное. Относительное влияние свободного движения тем более, чем больше **Δt°C** в отдельных точках ж. и чем меньше скорость вынужденного движения. Движение жидкости может быть ламинарным или турбулентным.

Движение жидкости может быть ламинарным или турбулентным.

При ламинарном режиме частицы ж. движутся пословно, не перемешиваясь. Ж. движется спокойно, без пульсаций, образуя струйки, следующие очертаниям канала или стенки и движущиеся параллельно друг другу. Скорость каждой отдельной частицы в любой момент направлена по линии общего движения ж. и не имеет составляющей по другим направлениям.

Ввиду наличия внутреннего трения скорость сильно изменяется по сечению канала, уменьшаясь от центра к стенкам (см. рис.) - например в круглой трубе.



ABC - профиль скоростей.
Максимальная скорость по оси трубы в этом случае вдвое больше средней скорости.

Турбулентный режим характеризуется непрерывным перемещением всех слоёв жидкости Представляет собой беспорядочное, хаотичное движение жидкости. Здесь нет параллельно направленных струек. Траектория частиц - сложные пространственно расположенные кривые. Каждая частица, движущаяся по общему направлению потока с некоторой скоростью, испытывает случайные отклонения - пульсации скорости, как в поперечных направлениях, так и вдоль общего движения. Распределение скоростей следующее: в центре сечения в 1,2...1,3 раза > средней скорости.

Переход ламинарного режима в турбулентный определяется критическим значением безразмерного комплекса - число (или критерий) Рейнольдса: $\mathbf{Re} = \frac{\omega l}{\nu}$

где: **ω** - скорость движения жидкости; **ν**- коэф. кинематической вязкости; l- характерный размер канала или обтекаемой стенки.

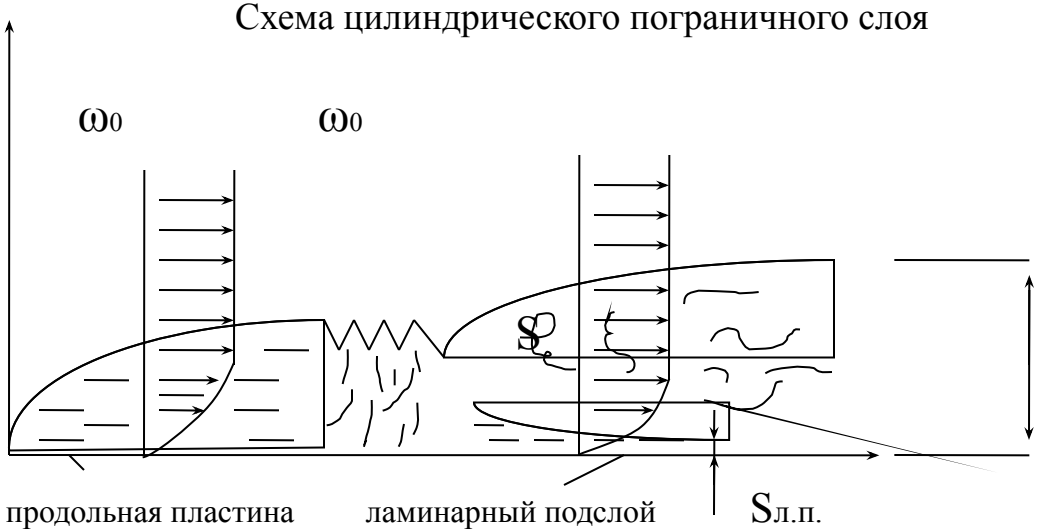
$$d_{экв} = \frac{4F}{P}$$

При Re < 2320 ламинарный характер движения.

При ламинарном движении при наличии разности **Δt°C** в направлении, перпендикулярном движению, в этом направлении устанавливается поток тепла за счёт теплопроводности (т.е. энергия передаётся от молекулы к молекуле, как в тв. теле). Так как теплопроводность жидкого масла, то распространение тепла при ламинарном движении очень слабое!

При турбулентном движении происходит перенос элементов жидкости в направлении, перпендикулярном стенке; вместе с этими элементами переносится и тепло, так как отдельные более горячие слои жидкости перемешиваются с другими более холодными. Поэтому при турбулентном движении теплообмен между ж. и с. Происходит более интенсивно , чем при ламинарном движении.

Схема цилиндрического пограничного слоя



При любом режиме движения жидкости, непосредственно прилегающий к поверхности, как бы прилипают к ней. В результате, вблизи обтекаемой поверхности вследствие действия сил вязкости образуется тонкий слой заторможенной жидкости,

в пределах которого скорость изменяется от нуля (на поверхности тела) до скорости невозмущённого потока (вдали от тела). Этот слой заторможенной жидкости называется – **гидродинамический пограничный слой.** Толщина слоя S возрастает вдоль по потоку, т. к. по мере движения, влияние вязкости распространяется всё больше на невозмущённый поток. При малых значениях **X** в пограничном слое – **ламинарное течение**. Постепенно оно переходит в турбулентное. Но и при турбулентном пограничном слое непосредственно у стенки есть очень тонкий слой жидкости, движение в котором носит ламинарный характер. Этот слой называется – **вязким, или ламинарным, подслоем.**

Существует понятие теплового пограничного слоя – прилегающего к твёрдой поверхности области, в которой температура ж. изменяется от **t**стенки до **t**жидкости вдали от тела. В общем случае толщины гидродинамического **S** и теплового **Sт** пограничных слоёв пропорциональны, а для газов практически равны.

Рис. Распределение **t** в движущемся потоке вблизи стенки.

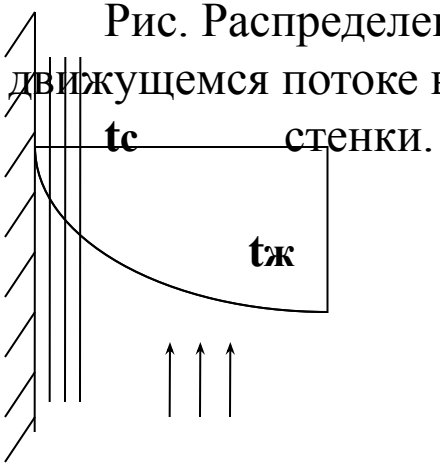
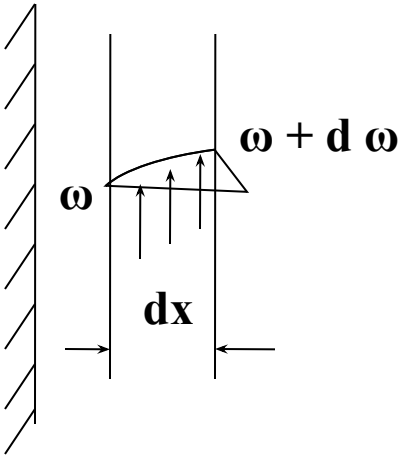


Рис.2 Изменение **ω** между двумя близкими слоями движущейся ж.



При движении ж. около стенки скорость отдельных слоёв не одинакова из-за наличия трения.

Если рассмотреть два соседних слоя (рис.1 и рис.2) то сила трения между ними будет пропорциональна поверхности соприкасающихся слоёв по направлению, перпендикулярному оси движения, и будет зависеть от св-в ж. Математическая запись сказанного:

$\mathbf{f = \mu s \frac{d\omega}{dx}}$ **;** где **f** – сила трения; **s** – поверхность соприкасающихся слоёв; $-\frac{d\omega}{dx}$ – изменение скорости (градиент скорости) по нормали к направлению движения**; μ -** коэф. Вязкости или коэф. внутреннего трения, или абсолютная вязкость.

$\mu = \frac{f}{s\frac{d\omega}{dx}}$; если принять **s – 1 м²**, $\frac{d\omega}{dx} = 1\ \frac{м/сек}{м}$; то **μ = f;** т.е. коэф. динамической вязкости, численно равен силе трения, возникающей при движении двух слоёв с поверхностями соприкосновения 1 **м²** при градиенте скорости между ними $1\ \frac{м/сек}{м}$ **μ - (н *** $сек/_{м^2}$

Коэффициент кинематической вязкости: **=** $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ($м^2/сек$

μ для газов зависит от **t ˚c;** зависимость μ от давления (при малых давлениях) столь мала, что можно считать **μ = f(t).**

ν для газов = **f (t,p);** т.к. плотность **p = f(p,t).**

Поэтому, для определения **ν** газов следует для заданной температуры из таблицы взять значение **μ,** а значение P и t определить по формуле, подставив то и другое значение в формулу для **ν,** находят **ν** для заданных условий.

Для воды - **μ = f(t)**; значение **f** для воды берут из таблицы водяного пара (автор - Вукалович).

Критерии Подобия

Методика постановки опытов для решений вопросов, связанных с явлениями теплообмена и сопротивлений при движении жидкостей, устанавливается теорией подобия, которая позволяет, с одной стороны, уменьшить число исследуемых факторов, а с другой - производить опыты не на самих аппаратах, очень громоздких и дорогих, а на их моделях, т.е. на устройствах, удобных для экспериментирования и дешёвых.

На модели легче, чем на исследуемом агрегате, можно изучить явление, например, движение газов в котле; на модели можно устранить недостатки конструкции путём переделок её и уже после выбора рациональной конструкции путём переделок её и уже после выбора рациональной конструкции перейти к построению реального агрегата; на модели выясняется и количественная сторона явлений, и затем полученные результаты применяют к реальному агрегату.

Согласно теории подобия нет необходимости выяснить зависимость **l** от каждого влияющего на него фактора. В любом из случаев теплообмена соприкосновением должна существовать однозначная зависимость между определёнными безразмерными комплексами величин, характеризующими процессы теплообмена; задача постановки
опытов и заключается в том, чтобы отыскать зависимость между этими комплексами.

Эти комплексы величин получили название критериев подобия, и каждый из них имеет своё обозначение. Обычно, принято критерии подобия обозначать двумя первыми буквами фамилии исследователей.

Наиболее важны следующие критерии подобия: **Re** = $= \frac{\omega l_0}{\nu} \quad \frac{\omega l_0 \rho}{\mu}$ритерий Рейнольдса, представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости;

Pr = $\frac{\nu}{a} = \frac{Cp * \mu}{\lambda}$ **-** критерий Прандтля, определяющий физические свойства жидкости;

$\frac{\alpha * l_0}{\lambda}$ **-** число (критерий) Нуссельта, представляющий безразмерный коэффициент теплоотдачи.

Где **ω** - скорость движения ж.; $\mathbf{l_0}$ - характерный линейный размер; **ρ** - плотность ж.;

a = $\frac{\lambda}{Cp * \rho}$ - коэффициент температуропроводности; **μ** - абсолютная (динамическая) вязкость ж. **Re, Pr, Nu** - безразмерные величины.

При вынужденном движении ж., когда явлением естественной конвекции пренебрегают, на основании выводов теории подобия аргументами должны быть критерии **Re** и **Pe** (Пекле): Pe = $\frac{\omega * l0}{a}$ $\frac{\omega * l_0 * Cp * \rho}{\lambda}$ - критерий Пекле.

Аналогично, при изучении сопротивлений, получающихся при движении жидкости, описываются зависимости между критериями подобия. Функцией в этом случае явл. критерий: **Eu =** $\frac{\Delta\rho}{\rho\omega^2}$ **-** критерий Эйлера, где **Δρ** - искомое падение давления.

Итак, при решении вопросов теплоотдачи в случае вынужденного движения ж. опытным путём отыскивается зависимость: $\mathbf{Nu = f_1(Re, Pe)}$.

Так же при нахождении падении давления в ж. при вынужденном движении опытным путём находим зависимость: $\mathbf{Eu = f_2(Re, Pe)}$.

Рассматривая выражения критериев и подобия через отдельные величины, видно, что критерий Pr это: **Pr =** $\frac{Pc}{Re}$

Тогда можно любой из двух критериев - аргументов заменить критерием Pr; при этом вид самой функции **f** будет иной: $\mathbf{Nu = F_1(Re, Pr)}$ или $\mathbf{Nu = F_2(Pe, Pr)}$

Критерии **Re, Pe, Pr** здесь наз. определяющими критериями. Величина Pr для газов почти не зависит от температуры, а для газов одинаковой атомности имеет почти одно и тоже значение:

-для одинаковых ≈ 0.67; - для двухатомных ≈ 0.72; -для трёхатомных ≈ 0.80; для четырёхатомных ≈ 1.0. Для водяного пара при параметрах, далёких от критических, Pr ≈ 1.

Для случаев естественной конвекции в газах находится зависимость: **Nu = Ψ(Gr),** где

Gr = $\frac{l0^3\rho^2\beta * \Delta t * g}{м^2}$ $\frac{l0^3\beta * \Delta t * g}{\nu^2}$ ий Грасгофа

β - истинный температурный коэф. объёмного расширения равный для газов (близких по свойствам и идеальному) = $\frac{1}{T}$**; т.е β =**$\frac{1}{T}$ где **T** - абсолютный темп;

Δt - разность температур между ж. и стенкой (или наоборот). Для капельных жидкостей и газов разностной атомности в это уравнение **Gr** входит **Pr** - в качестве добавочного аргумента.

В выше приведённые формулы входит $\mathbf{l_0}$ - определяющий геометрический размер. Например для круглых труб $\mathbf{l_0 = d_H}$ **или** $\mathbf{d_{внутр}}$; для труб другого сечения $\mathbf{l_0 = d_э =}$ **;** где **F** - $\frac{4F}{P}$ ощадь поперечного сечения; **P** - смоченный параметр сечения.

Таблица 7.

Основные критерии подобия

Символ и формула критерия	Наименование	Физический смысл
$H_0 = \frac{w\tau}{L}$	Критерий гидродинамической гомохронности	Характеризует меру отношения переносного (конвективного) ускорения к ускорению в данной точке
$Re = \frac{wL}{\nu}$	Критерий режима движения. Число Рейнольдса.	Характеризует режим движения при вынужденной конвекции, являясь отношением сил инерции и сил вязкости (внутреннего трения)
$Gr = \frac{\beta \Delta T L^3 g}{\nu^2}$	Критерий свободного движения среды. Число Грасгофа	Характеризует режим движения при свободной конвекции, являясь отношением подъемной силы, возникающей вследствие разности плотностей жидкости, и сил вязкости в неизотермическом потоке
$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$	Критерий подобия полей давления (число Эйлера)	Характеризует соотношение сил давления и сил инерции в потоке
$Fr = \frac{w^2}{gL}$	Критерий гравитационного подобия (число Фруда)	Характеризует соотношение сил тяжести и сил инерции в потоке
$Ga = \frac{gL^3}{\nu^2}$	Критерий полей свободного течения (число Галилея)	Характеризует соотношение сил вязкости и сил тяжести в потоке
$Ar = \frac{gL^3}{\nu^2}\frac{\Delta\rho}{\rho}$	Число Архимеда	Характеризует отношение подъемных сил к силам инерции
$Nu = \alpha L / \lambda_f$ $(Nu_м = \beta L / D)$	Безразмерный коэффициент теплоотдачи (массоотдачи). Тепловое (диффузионное) число Нуссельта	Характеризует увеличение теплообмена (массообмена) за счет конвекции по сравнению с чисто молекулярным переносом
$Pr = \nu / a_p = \mu c_p / \lambda_f$ $(Sc = \nu / D)$	Тепловое (диффузионное) число Прандтля (Шмидта)	Характеризует подобие скоростных и температурных (массовых) полей. При $\nu = a_p = D$ поля скоростей, температур и концентраций подобны

Символ и формула критерия	Наименование	Физический смысл
$We = \frac{\rho w L}{\sigma}$	Число Вебера	Соотношение сил инерции и поверхностного натяжения в двухфазном потоке
$P_0 = \frac{Q_v L^2}{\Delta T \lambda_w}$	Критерий обобщенной интенсивности внутренних источников теплоты (число Померанцева)	Характеризует отношение мощности источника теплоты в единице объема к количеству теплоты, переносимому в этом объеме через единицу поверхности с характерным размером L
$Le = \frac{D}{a}$	Число Льюиса-Семенова, $Le = \frac{Pr}{Pr_м}$	Характеризует подобие безразмерных полей температур и концентраций
$Pe = \frac{wL}{a} (Pe_м = \frac{wL}{D})$	Критерий теплового (массового) подобия. Тепловое (диффузионное) число Пекле	Характеризует соотношение конвективного и молекулярного переносов теплоты (вещества) в потоке
$Fo = \frac{a\tau}{L^2} (Fo_м = \frac{D\tau}{L^2})$	. Критерий тепловой (массовой) гомохронности. Тепловое (диффузионное) число Фурье	Характеризует связь между физическими свойствами и размерами тела и скоростью изменения в нем полей температуры (концентрации)
$St = \frac{\alpha}{c_p \rho w}$ $(St_м = \frac{\beta}{w})$	Критерий конвективного переноса теплоты (вещества). Тепловое (диффузионное) число Стентона	Характеризует соотношение скорости переноса теплоты (вещества) и линейной скорости потока
$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda_w}$	Критерий краевого подобия (число Био)	Характеризует связь между полем температур в твердом теле и условиями теплоотдачи на его поверхности
$Ku = \frac{r}{c_p \Delta T_s}$	Критерий фазового перехода ΔT_s – перегрев (переохлаждение) относительно температуры фазового перехода; r – теплота фазового перехода	Характеризует соотношение теплоты фазового перехода и теплоты перегрева (переохлаждения) вновь образующейся фазы