

■ Тема №12. Конвективный теплообмен, основы теории подобия.

■ **12.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.**

- Конвективным теплообменом, или теплоотдачей, называется процесс переноса тепла между средой. При этом перенос тепла идет одновременно действием теплопроводности и конвекции
- По природе возникновения различают два вида движения – свободное и вынужденное.
- И интенсивность конвекции характеризуется коэффициентом теплоотдачи, которая определяется уравнением Ньютона – Рихмана

$$Q = \alpha F (t_c - t_{жс}). \quad (12.1)$$

- Отсюда определяем α :

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_c - t_{жс})}. \quad (13.2)$$

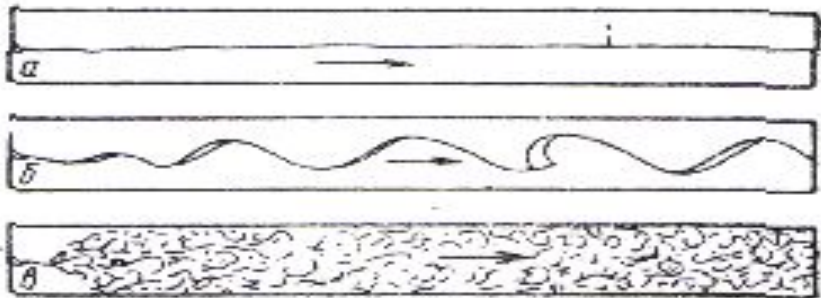


Рис. 12-1. Характер движения жидкости в трубе при ламинарном (а), переходном (б) и турбулентном (в) режимах.

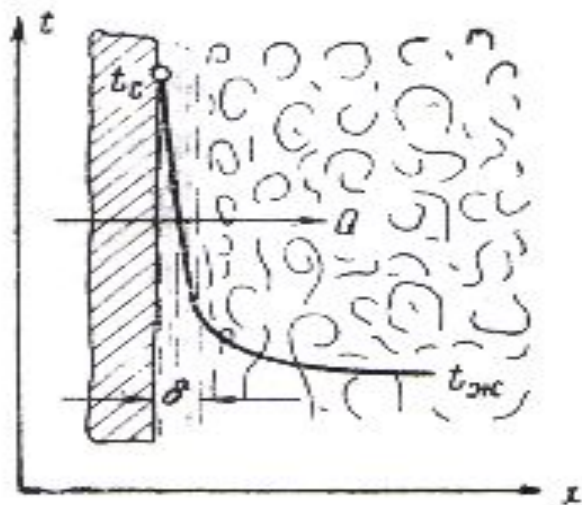


Рис. 12-2. Характер изменения температуры в пограничном слое при нагревании жидкости.

- Теплоотдача неразрывно связана с условиями движения жидкости. Имеются два основных режима течения: ламинарный и турбулентный. Переход ламинарного режима в турбулентный происходит при $Re_{кр}$ например, при движении жидкости в трубах $Re_{кр} = V_{кр} d / \nu = 2 \cdot 10^3$.

- При ламинарном режиме течения перенос тепла идет за счет теплопроводности. При турбулентном режиме такой перенос тепла сохраняется лишь в вязком подслое, а в турбулентном ядра за счет интенсивного перемешивания частиц жидкости. В этом легко убедиться, если проследить за изменением температуры жидкости в направлении нормали к стенке (Рис. 12.2.)

- Следовательно, как для ламинарного, так и для турбулентного режима течения вблизи самой поверхности применим закон Фурье:

$$q = -\lambda \text{grad} t, \quad (12.3)$$

- Где $\text{grad} t$ – градиент температуры в слоях жидкости, прилегающих к поверхности твердого тела, 0с/м .
- Коэффициент теплоотдачи является сложной функцией различных величин:

$$\alpha = f(v, t_c, t_{ж}, \lambda, c_p, \rho, \mu, a, l_1, l_2 \dots). \quad (12.4)$$

- В настоящее время опытное определение коэффициента теплоотдачи производится, как правило, не на самих образцах тепловых устройств, а на их упрощенных и более удобных моделях. Результаты, опытов, проведенных на моделях, обобщаются при помощи тепловой теории подобия. Основной вывод, который дает эта теория подобия, заключается в том, что нет необходимости искать зависимость коэффициента теплоотдачи от каждого в отдельности из тех факторов, которые на него влияют, а достаточно найти зависимость между определенными безразмерными комплексами величин, характерных для рассматриваемых условий процесса теплоотдачи. Эти безразмерные комплексы величин называют критериями подобия. Составленные из размерных величин критерии подобия отражают физическую сущность, или, как говорят, модель процесса.

■ 12.2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ.

- Теория подобия- это наука о подобных явлениях. Термин «подобие» взят из геометрии Подобие геометрических фигур является частным случаем и составным элементом более общего подобия - подобия физических явлений. Физические явления называются подобными, если они протекают в геометрически подобных системах, а отношения одноименных параметров, взятые в сходственных точках и в сходственные моменты времени, будут постоянными числами (константами подобия).
- Константы подобия принято обозначать буквой C с буквенным индексом, соответствующим конкретному физическому параметру. Например, процесс теплообмена обусловлен неоднородным полем температуры в системе t_1 и t_2 -скоростью теплоносителя, геометрическими размерами поверхности теплообмена l , физическими свойствами среды и др. Тогда подобие двух таких родственных процессов будет определяться следующими константами подобия: $\omega''/\omega' = C_\omega$; $t''/t' = C_t$; $l''/l' = C_l$; $v''/v' = C_v$; $\lambda''/\lambda' = C_\lambda$ и т. д.

- Для подобия явлений необходима не только идентичность математического описания, но и их одинаковая природа. Например, закон теплопроводности Фурье и закон электропроводности имеют одинаковое математическое описание, но их природа различна. Такие явления не подобны, а аналогичны
- Связь между параметрами, описывающая данное явление, влечет за собой и связь между константами подобия. Анализ этих связей приводит к определенным, имеющим физический смысл без размерным комплексам, состоящим из физических и других параметров явления и называемых критериями или числами подобия.
- Для каждого физического явления имеется определенный набор чисел подобия, которые его характеризуют.
- Например, рассматривая два подобных процесса переноса теплоты с поверхности твердого тела в окружающую среду, запишем

$$\alpha' \Delta t' = (\lambda' / \delta') \Delta t' \quad \text{и} \quad \alpha'' \Delta t'' = (\lambda'' / \delta'') \Delta t''$$

- Разделив почленно величины, относящиеся к одному подобному процессу, на соответствующие величины второго подобного процесса, получим $\alpha' / \alpha'' = (\lambda' / \lambda'') \div (\delta' / \delta'')$.

- Заменяя полученные соотношения на константы подобия, получаем связь между константами подобия:

$$C_\alpha = C_\lambda / C_\delta, \quad C_\alpha C_\delta / C_\lambda = 1 \quad (12.5)$$

- После подстановки соответствующих величин в уравнение 12.5. имеем:

$$\alpha' \delta' / \lambda' = \alpha'' \delta'' / \lambda'' = idem, \quad (12.6)$$

- т.е. у подобных явлений в сходственных точках существуют определенные уравнением безразмерные комплексы (критерии или числа подобия}, состоящие из параметров изучаемого явления и имеющие одни и те же значения. Каждому числу подобия соответствует свое обозначение, например выражение (12.6) называется числом Нуссельта:

$$Nu = \alpha l / \lambda = idem, \quad (12.7)$$

Числа подобия называются именами ученых, внесших свой вклад в науку о теплообмене.

- *Итак, подобие явлений можно характеризовать при помощи либо констант подобия, либо чисел подобия. При этом, если константы Подобия характеризуют подобие только двух рассматриваемых явлений и имеют одно и то же значение для всех сходственных точек, числа подобия имеют одинаковое значение в сходственных точках для целого класса подобных систем, но в пределах одной системы числа подобия различаются.*
- *В связи с этим при помощи констант подобия моделируются технические устройства. Числа же подобия используются при обобщении и обработке экспериментальных и расчетных данных. Получаемая при этом обобщенная зависимость между числами подобия, характеризующими данное явление, может использоваться для расчета целого класса подобных явлений одинаковой природы*
- *Данные числа (или критерии) подобия имеют определенную процессом так называемую критериальную связь между собой (уравнение подобия) В общем случае уравнение подобия для процессов теплоотдачи имеет вид:*

$$Nu=f(Re,Pr,Gr). \quad (12.8)$$

- Критериальное уравнение теплоотдачи показывает, что главными факторами, влияющими на стабилизированную теплоотдачу, являются режим течения (Re), природа теплоносителя (Pr), интенсивность свободной конвекции ($GrPr$)
- Наиболее удобная и распространенная в исследованиях форма представления функции Nu при обобщении опытных данных по теплоотдаче -степенная

$$Nu = CRe^n Pr^m Gr^k, \quad (12.9)$$

где C , n , m и k - постоянные аппроксимации. Величина этих постоянных показывает степень влияния соответствующего числа подобия (показатели степени n , m , k) на теплоотдачу, а также общий уровень теплоотдачи (коэффициент C) при принятых условиях конвективного теплообмена.

- Из анализа зависимости (12.9) следует:

число Нуссельта $Nu = \alpha l / \lambda$ - безразмерный коэффициент теплоотдачи;

- Число Рейнольдса $Re =$ - безразмерная скорость потока (режимный параметр);
- число Прандтля $Pr = \nu/\alpha$ - характеризует влияние теплофизических свойств теплоносителя на процесс конвективного теплообмена,
- число Грасгофа $Gr = \frac{g\beta\Delta t l^3}{\nu^2}$ - характеризует влияние свободной конвекции на теплообмен (здесь $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $\beta = 1/T$, K^{-1} - температурный коэффициент объемного расширения; ν , $\text{м}^2/\text{с}$ - коэффициент кинематической вязкости).
- Характерный размер исследуемой системы, входящий в числа подобия (масштаб подобия), называется определяющим (например, для конвективной теплоотдачи в трубе - диаметр трубы).
- Физические свойства теплоносителя зависят от его температуры, которая различна как по сечению потока, так и по длине канала, поэтому вопрос, к какой температуре эти свойства следует относить, имеет важное значение. Температура, по которой рассчитываются физические параметры теплоносителя, называется определяющей. Это может быть температура стенки, температура теплоносителя вдали от стенки, средняя температура теплоносителя и др.

12.3. ПОДОБИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ.

- Процесс естественной или свободной конвекции возникает из-за разности плотностей нагретых и холодных частиц теплоносителя. Для большинства теплоносителей зависимость плотности от температуры можно считать линейной. Зависимость плотности от температуры связаны уравнением:

$$\rho = \rho_{жс} [1 - \beta(t - t_{жс})], \quad (12.10)$$

- Где β - коэффициент объемного расширения.
- Так как β , то на частицы нагретой жидкости, действует подъемная Архимедова сила:

$$g(\rho_{жс} - \rho) = g\rho_{жс} \beta(t - t_{жс}) \quad (12.11)$$

- Эта сила вызывает конвекционное движение, предпосылкой подобия процессов теплообмена при естественной конвекции должно быть подобие геометрических систем и подобие температурных полей на поверхностях нагрева или охлаждения. Если это выполняется, то стационарные процессы свободной конвекции будут подобны, если два определяющих критерия – критерий Граскофа Gr и критерий Прандтле Pr , для таких систем будут численно равны:

$$Gr = idem; \quad (12.12)$$

$$Pr = idem.$$

- Уравнения подобия или критериальное уравнение для процессов теплообмена при свободной конвекции имеет вид:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (12.13)$$

12.4. ПОДОБИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ.

Прежде всего подобными могут быть лишь процессы теплообмена, протекающие в геометрически подобных системах. Далее, должно быть подобие полей – полей скоростей, температуры и давления во входном или начальном сечении таких систем. При выполнении этих условий стационарные процессы конвективного теплообмена при вынужденном движении будут подобны, если два определяющих критерия – критерий Рейнольда Re и критерий Прандля Pr – для таких систем будут идентичными:

$$Re = idem;$$

$$Pr = idem. \quad (12.14)$$

Согласно теории подобия у подобных процессов должна быть одинаковы также и определяемые критерия подобия:

$$Nu = \alpha \cdot l / \lambda = idem \quad (12.15)$$

Уравнения подобия или критериальное уравнение для процессов конвективного теплообмена при вынужденном движении теплоносителя имеет вид:

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (12.16)$$

■ 12.5. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕН ПРИ СВОБОДНО-ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ.

- На практике так же встречаются случаи, когда одновременно с вынужденным движением в системе под действием подъёмных сил развиваются токи свободной конвекции т.е. имеет место свободно – вынужденное движение теплоносителя. В таком более сложном случае необходимо инвариантность (одинаковость) уже не двух, а трех определяющих критериев: Re , Gr и Pr . Соответствующее критериальное уравнение принимает вид:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr). \quad (12.17)$$

- При совместном свободно – вынужденном движении гидромеханические и тепловые процессы взаимосвязаны, поэтому определяемый гидромеханический критерий Эйлера Eu является функцией тех же определяющих критериев:

$$Eu = \varphi(Re, Gr, Pr), \quad (12.18)$$

- Где $Eu = \Delta P / \rho \omega^2$. Приведенные выше условия подобия относятся к стационарным процессам конвективного теплообмена. Для нестационарных процессов, т.е. процессов, изменяющихся во времени, необходимо добавить еще одно условие, определяющее временное подобие процессов:

$$Fo = a\tau / l^2 = idem \quad (12.19)$$

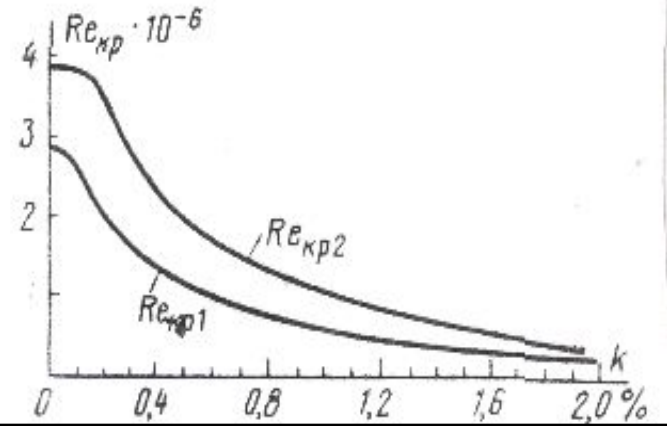
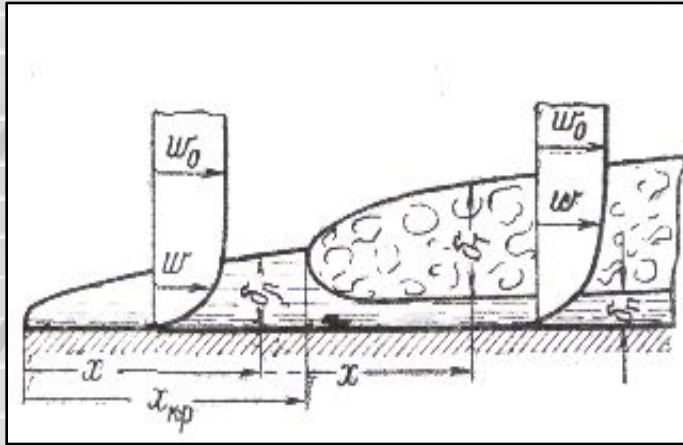
- где τ - время; a - коэффициент температуропроводности; l – характерный геометрический размер; Fo – критерий Фурье.

12.5. Теплообмен при обтекании плоской поверхности.

12.5.1. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА.

- При продольном течении жидкости вдоль плоской поверхности происходит образование гидродинамического пограничного слоя, в пределах которого вследствие сил вязкого трения скорость изменяется от значения скорости и невозмущенного потока на внешней границе слоя до нуля до самой поверхности пластины.
- По мере движения потока вдоль поверхности толщина пограничного слоя постепенно возрастает; тормозящее воздействие стенки распространяется на все более далекие слои жидкости. На небольших расстояниях от передней кромки пластины пограничный слой весьма тонкий и течение жидкости в нем носит струйный ламинарный характер.
- На некотором расстоянии $X_{кр}$ в пограничном слое начинают возникать вихри и течение принимает турбулентный характер.

- Вихри обеспечивают интенсивное перемешивание жидкости в пограничном слое, однако непосредственной близости от поверхности они затухают, и здесь сохраняется очень тонкий вязкий подслой. Картина развития процесса показана на рис.12.3.



- Рис.12.3 Схема движения жидкости обтекании пластины.

Рис.12.4. Зависимость при Критического числа Re от степени турбулентности потока

Толщина пограничного слоя зависит от расстояния от передней кромки пластины, скорости потока ω_0 и кинематической вязкости ν . При ламинарном пограничном слое.

(12.20)

$$\delta'_l = 5 \frac{x}{Re_x^{0.5}} = 5 \left(\frac{x\nu}{\omega_0} \right)^{0.5}$$

- При турбулентном пограничном слое

$$\delta_m = 0,67 \frac{x}{\text{Re}_x^{0,2}} = 0,37 \left(\frac{x^4 \nu}{\omega_0} \right)^{0,2}, \quad (12.21)$$

- Где $\text{Re}_x = \omega_0 x / \nu$ - число Рейнольдса, в котором в качестве характерного размера принято расстояние .
- Переход к турбулентному режиму течения жидкости в пограничном слое определяется критическим значением числа Рейнольдса:
- $\text{Re}_x = \omega_x x_{кр} / \nu$ - которое при продольном обтекании пластины обычно принимают равным $5 \cdot 10^5$.
- Величина $\text{Re}_{кр}$ зависит от ряда факторов. Основное влияние оказывает степень начальной турбулентности набегающего потока, т.е. наличие в потоке начальных возмущений и завихрений. Степень турбулентности принято характеризовать отношением величины средней скорости турбулентных пульсаций V_n к скорости движения потока ω , т.е. коэффициентом V_n / ω . Чем выше начальная турбулентность потока, тем меньше $\text{Re}_{кр}$ средняя скорость пульсаций в потоке:

$$V_n = \sqrt{\frac{1}{3} (\overline{V'})^2},$$

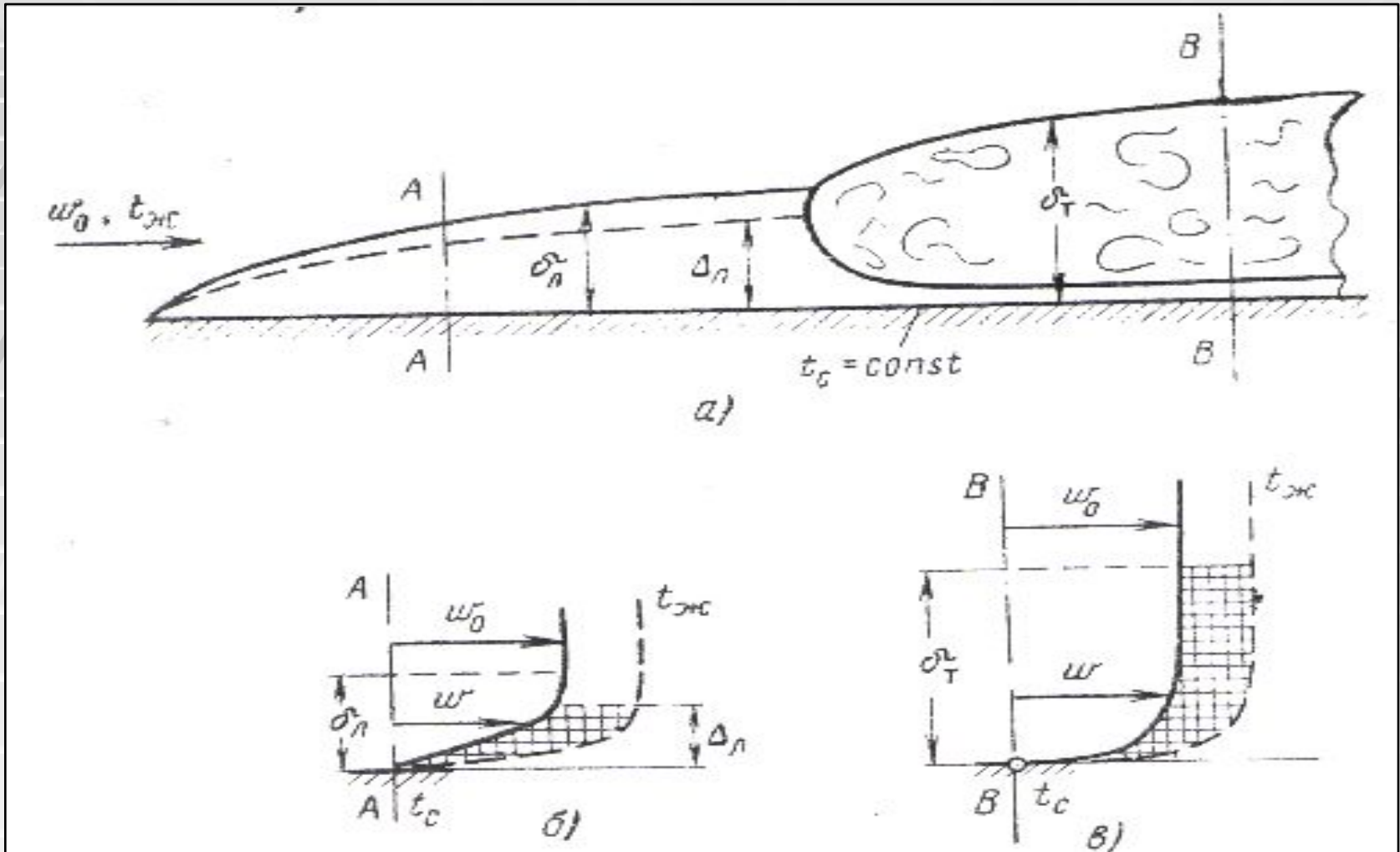
Где $\overline{V'}$ - мгновенное значение вектора пульсационной скорости;
 $(\overline{V'})^2_{cp}$ - осредненное во времени значение квадрата $\overline{V'}$.

- Кроме того, на величину $Re_{кр}$ может влиять шероховатость поверхности, интенсивность тепло обмена и т.д. Сам процесс перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения жидкости в пограничном слое происходит не в точке, а на некотором участке, в связи с чем иногда вводят два значения: $Re_{кр1}$ и $Re_{кр2}$, где $Re_{кр1} = \omega_0 x_{кр1} / \nu$ - критическое значение Рейнольдса, отвечающее переходу от ламинарного к переходному режиму течения, когда в погранслое возникают первые вихри и пульсации; $Re_{кр2} = \omega_0 x_{кр2} / \nu$ - критическое число Рейнольдса для перехода к развитому турбулентному режиму течения. На рис.12.4. приведены зависимости $Re_{кр1}$ и $Re_{кр2}$ от степени начальной турбулентности набегающего потока.

■ 12.5.2. ТЕПЛООТДАЧА.

- Когда температура поверхности пластины $t_{ж}$ и температура набегающего потока $t_{ж}$ различны, то происходит процесс теплообмена. Согласно закону Ньютона: $q = \alpha(t_c - t_{жс})$. Коэффициент теплоотдачи α зависит от режима течения теплоносителя, расстояния x от передней кромки пластины и теплофизических свойств среды.
- В процессе теплообмена около поверхности пластины формируется тепловой пограничный слой, в пределах которого температура изменяется от значения, равного температуре стенки t_c , до температуры вдали от поверхности $t_{ж}$ (Рис.12.5.). Сам характер формирования теплового слоя оказывается во многом сходным с характером развития гидродинамического пограничного слоя.
- Так при ламинарном пограничном слое отношение толщины динамического и теплового слоев зависит только от числа Прандтля, т.е. от физических свойств теплоносителя. Это значит, что зависимость Δ от скорости ω_0 и расстояния x сохраняется такой же, как и для динамического слоя. При значении $Pr=1$ толщины слоев оказываются численно равными друг другу: $\Delta = \delta$. При ламинарном течении перенос тепла между слоями жидкости осуществляется путем теплопроводности. В турбулентном ядре пограничного слоя из-за интенсивного перемешивания жидкости изменение температуры незначительно и поле температур имеет ровный, плоский характер.

- Отсюда, как при ламинарном, так и при турбулентном режиме движения жидкости в пограничном слое между распределением температур и скоростей существует качественное сходство (см. рис. 12.5., б, в)



- Рис.12.5. Тепловой и динамический пограничные слои при обтекании, пластины (а). Поле температур и скоростей в ламинарном (б) и турбулентном (в) пограничном слое.

- Если разность температур $t_c - t_{ж}$ растет, то возникают дополнительные осложнения процесса, связанные с изменением физических параметров теплоносителя. Чем больше перепад температур, тем больше изменяется вязкость, теплопроводность и теплоемкость теплоносителя в разных точках предела пограничного слоя.
- В результате этот эффект оказывает влияние на интенсивность теплоотдачи. Например, если тепло передается от капельной жидкости к стенке (т.е. охлаждение жидкости в пограничном слое), то температура слоев жидкости у поверхности становится меньше, а вязкость, следовательно, больше и скорость течения уменьшается.
- В итоге изменяется гидродинамическая картина течения, что вызывает так же изменение и теплоотдачи.