

§ 16. О сопряженных задачах конвективного теплообмена

В задачах конвективного теплообмена между телом и потоком жидкости или газа используются, как правило, граничные условия 3-го рода (закон Ньютона), т.е. условия пропорциональности теплового потока у стенки q_w разности между температурами стенки T_w и набегающего потока T_∞ :

$$q_w = \alpha(T_w - T_\infty). \quad (5.82)$$

Коэффициент пропорциональности α называется коэффициентом теплообмена, $[\alpha] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$, и при его теоретическом определении обычно предполагают, что условия на стенке заданы и являются постоянными.

Коэффициент теплообмена α используется в двух различных аспектах:

1. как заданный коэффициент в граничном условии 3-го рода (определяемый из эксперимента);
2. как коэффициент, определяемый из решения задачи теплообмена в жидкости при заданной температуре на поверхности.

Однако, как показано Шлихтингом, во многих практически важных случаях (в частности, при высокоинтенсивных процессах) нельзя считать T_w постоянной величиной, т.е. $T_w \neq \text{Const}$. Поэтому при заданной заранее зависимости T_w от продольной координаты x использование закона Ньютона не всегда является приемлемым.

В самом деле, воспользуемся законом Ньютона (5.82) и законом Фурье вида:

$$q_w = -\lambda \left. \frac{dT}{dy} \right|_w. \quad (5.83)$$

Полученное в данном случае решение для профиля температуры может привести к совершенно разным результатам (рис. 5.10).

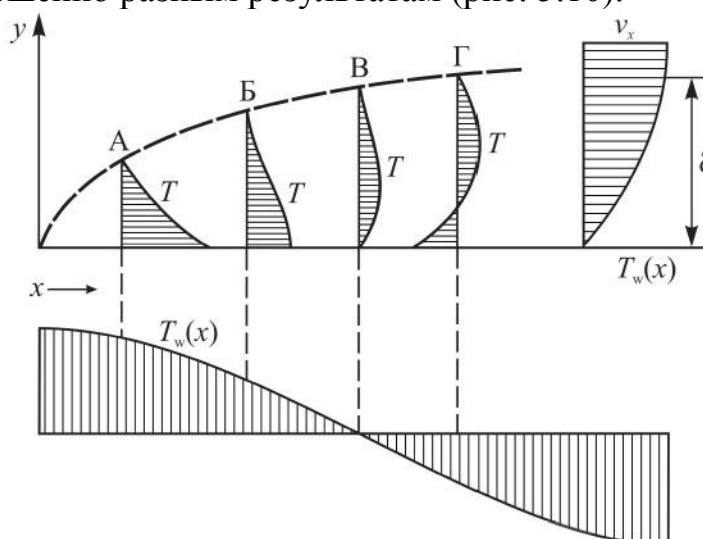


Рис. 5.10 – Профиль температуры в пограничном слое и при заданной $T_w(x)$

Вблизи передней кромки температурный профиль в пограничном слое близок к типу А, который соответствует профилю в случае постоянной температуры T_w ($\alpha > 0$). Однако вниз по потоку имеются точки, в которых коэффициент теплообмена отрицательный ($\alpha < 0$) или даже терпит бесконечный разрыв. Так на участке между Б и В тепло передается от жидкости к стенке, хотя $T_w > T_\infty$.

Таким образом, коэффициент теплообмена α имеет реальный физический смысл только для специфических температурных распределений на границе раздела, которые точно неизвестны. Поэтому:

1. условия на поверхности раздела не всегда могут задаваться, зачастую их необходимо получить путем решения уравнений распространения тепла в твердом теле и жидкости совместно с уравнениями движения;
2. на границе тело – жидкость должны быть заданы условия сопряжения, т.е. условия равенства температур и тепловых потоков.

Такая постановка задачи теплообмена называется сопряженной.

Формулировка задач конвективного теплообмена как сопряженных особенно важна в нестационарном случае, когда величина теплового потока, α , значит, и числа Нуссельта, на границе раздела твердое тело – жидкость зависит от времени и характеристик твердого тела. В этом заключается отличие процессов нестационарного теплообмена от стационарного, где зависимость процесса от свойств потока и тела проявляется только в том случае, когда теплофизические характеристики тела и жидкости не очень заметно отличаются.

Заметим, что проведение теплового эксперимента в нестационарных условиях связано с большими трудностями, т.к. методический аппарат, развитый для малоинтенсивных, слабо меняющихся или стационарных режимов, оказался непригодным в условиях неустановившегося теплового процесса большой интенсивности. Таким образом, определение нестационарных тепловых потоков, температуры на поверхности тела и теплофизических характеристик исследуемого материала во многих случаях может быть выполнено только с привлечением обратных задач теплообмена. Применение принципа обратных задач теплообмена позволяет определить внешний тепловой режим по данным внутренних температурных измерений в твердом теле, т.е. найти тепловые потоки и температуры на поверхности тел. Особенно важны обратные задачи теплообмена при исследовании нестационарного теплообмена в системе внешняя среда – твердое тело. Во многих случаях только таким путем можно получить ответ на вопрос о степени сопряженности высокоинтенсивных нестационарных теплообменных процессов.

Еще одним важным классом задач тепло- и массопереноса являются задачи теплообмена с фазовыми и химическими превращениями при обтекании твердого (или пористого) тела потоком нагретого газа,

конденсации паров, диффузии вещества через пористую поверхность и т.д. Такие задачи рассматриваются как сопряженные, т.е. необходимо совместно решать уравнения переноса в двух средах.

Наиболее сложным вопросом при математической формулировке таких задач является правильная запись краевых условий на, как правило, движущейся границе раздела сред, где имеют место фазовые или химические превращения. Движущаяся граница раздела фаз является поверхностью сильного разрыва, на которой следует задавать условия сопряжения, получаемые из законов сохранения массы, импульса и энергии. В то же время для нахождения однозначного решения недостаточно одних условий сопряжения. Необходимо формулировать дополнительные условия на поверхности разрыва, которые характеризуют степень неравновесности фазовых переходов и химических реакций, разрежение газа, а также кинетику массопереноса внутри пористого тела, если не рассматривается уравнение массопереноса в зоне испарения.

Раздел 6. Элементы теории турбулентного переноса

§ 17. Турбулентные течения

17.1 Переход к турбулентности

Существуют два класса сильно отличающихся по своим характеристикам течений – ламинарные и турбулентные (рис. 6.1).

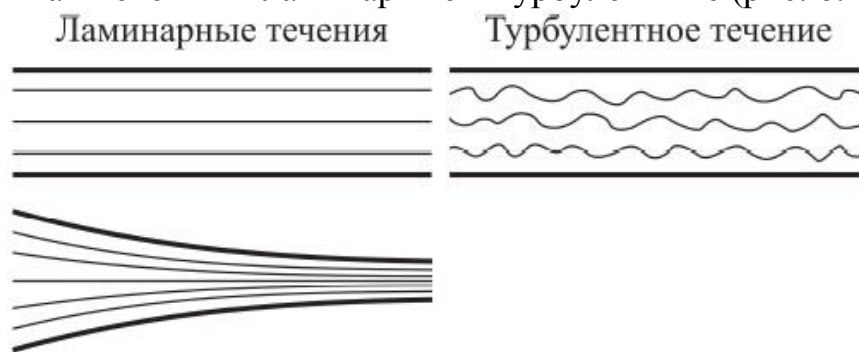


Рис. 6.1 – Ламинарные и турбулентные течения

Ламинарные течения при стационарных внешних условиях в конечном итоге всегда выходят на стационарный режим. Свойства ламинарных течений:

1. упорядоченность течения;
2. траектории элементов жидкости представляют собой плавные, не перемежающиеся друг с другом линии.

Для турбулентных течений характерны следующие основные признаки:

1. нерегулярность, хаотичность течения;
2. трехмерность, проявляющаяся в появлении разномасштабных хаотически взаимодействующих вихрей даже при внешних условиях, предполагающих маломерность течения;

3. нестационарность, проявляющаяся в пульсациях гидродинамических параметров даже при стационарных внешних условиях;
4. интенсификация процессов переноса: вязкость (перенос импульса), теплопроводность, диффузия на несколько порядков интенсивнее, чем в ламинарных течениях;
5. встречаются в области больших чисел Рейнольдса.

Приведем некоторые определения, более или менее полно отражающие природу такого комплексного явления как турбулентность.

Турбулентность – это трехмерное нестационарное движение жидкости, в котором вследствие растяжения вихрей создается непрерывное распределение хаотических пульсаций параметров потока (скорости, давления и т.д.) в интервале длин волн от минимальных, определяемых вязкими силами, до максимальных, определяемых граничными условиями течения (Брэдшоу).

Турбулентность – это неупорядоченное движение, которое в общем случае возникает в жидкостях, газообразных или капельных средах, когда они обтекают непроницаемые поверхности или когда соседние друг с другом потоки одной и той же жидкости следуют рядом или проникают один в другой (Карман).

Турбулентное движение жидкости предполагает наличие неупорядоченного течения, в котором различные величины претерпевают хаотическое изменение во времени и по пространственным координатам и при этом могут быть выделены статистически точные их осредненные значения (Хинце).

На рис. 6.2 приведена зависимость локального коэффициента сопротивления в круглой трубе, определяемого согласно (3.26) как $C'_f = \frac{\tau_w}{P}$,

т.е. в данном случае равно $C'_f = \frac{\tau_w}{8\rho\bar{u}^2} = \frac{R}{16\rho\bar{u}^2} \frac{dp}{dz}$, от критерия Рейнольдса.

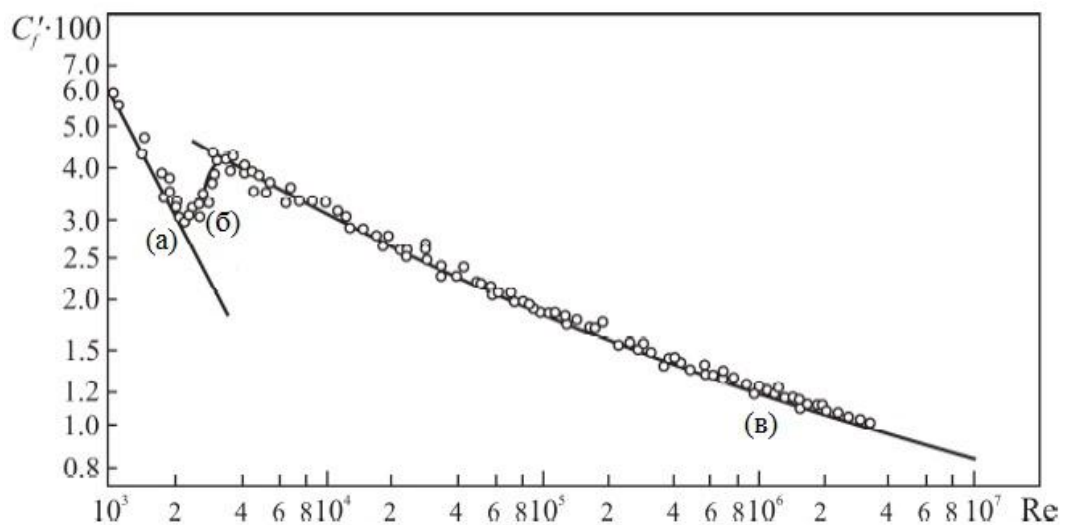


Рис. 6.2 – Зависимость локального коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса

Наглядно виден различный характер этой зависимости в ламинарной (а), переходной (б) и турбулентной (в) областях.

С физической точки зрения причиной возникновения турбулентности является неустойчивость того или иного рода, возникающая в рассматриваемом течении (например, след за цилиндром или струя). Во многих случаях возникновению турбулентности предшествует появление упорядоченных нестационарных структур (например, вихревых колец).

С математической точки зрения появление турбулентности (как решения уравнений Навье – Стокса), как правило, обусловлено доминированием дестабилизирующих инерционных членов над стабилизирующими вязкими членами в уравнении баланса импульса (1.22).

В результате этого, решения уравнения Навье – Стокса, описывающие течения жидкости или газа, теряют устойчивость. При этом происходит лавинообразное накопление возмущений определенного вида. Следует отметить, что при потере устойчивости колебания только начинают развиваться, полностью турбулентным течение становится гораздо позже (ниже по потоку), когда амплитуды пульсаций достигнут определенного уровня. Нелинейность гидродинамических систем и соответственно описывающих их уравнений Навье – Стокса приводит к тому, что амплитуда возмущений оказывается ограниченной. Когда амплитуда возмущений достигает насыщения, говорят, что течение стало «развитым турбулентным».

Таким образом, критерием смены режимов, т.е. перехода от ламинарного течения к турбулентному, должен быть критерий Рейнольдса (6.1), который и отражает отношение сил инерции, действующих в потоке, к силам вязкости:

$$Re = \frac{uL}{\nu} . \quad (6.1)$$

Для каждого типа течений существует свое критическое значение критерия Рейнольдса, являющееся критерием смены режима. Можно различать нижнее и верхнее критические значения Re .

Рассмотрим этот вопрос на примере течения в круглой трубе. Для круглой трубы нижним критическим значением критерия Рейнольдса является $Re_{кр.нижн.} \approx 2300$. Это означает, что для $Re < Re_{кр.нижн.}$ течение всегда ламинарное и, если даже будет внесено какое-то возмущение, оно затухнет и ламинарный режим восстановится. Верхнее критическое значение критерия Рейнольдса в этом случае $Re_{кр.верхн.} \approx 5 \cdot 10^4$ определяет порог, выше которого, т.е. для $Re > Re_{кр.верхн.}$, течение всегда турбулентное и уже не может быть ламинарным ни при каких условиях. В области критериев Рейнольдса $Re_{кр.нижн.} < Re < Re_{кр.верхн.}$ режим течения зависит от внешних условий (могут быть организованы как ламинарное, так и турбулентное течения). Это область переходных режимов, в которой ламинарному режиму способствуют такие факторы, как плавные обводы входа в канал, низкий уровень турбулентности входящего потока, гладкие без шероховатостей стенки

канала. И наоборот, отсутствие этих факторов провоцирует генерацию турбулентности.

Для других типов течения пороги перехода к турбулентности могут значительно отличаться от приведенных выше. Так, для затопленных струй порог перехода к турбулентности имеет величину порядка $Re_{кр} \approx 10$, хотя на начальном участке струи может наблюдаться ламинарное течение и при больших значениях Re .

Для пограничного слоя можно ввести число Рейнольдса, построенное по толщине пограничного слоя \Rightarrow (6.1) \Rightarrow

$$Re_{\delta} = \frac{u\delta}{\nu}. \quad (6.1')$$

В этом случае на разных участках пограничного слоя отмечаются разные режимы течения: на начальном участке, где $Re_{\delta} < Re_{\delta_{кр}}$, наблюдается ламинарное течение, а за ним происходит переход к турбулентности, причем критическое значение данного критерия Рейнольдса $Re_{\delta_{кр}} \approx 2 \cdot 10^3$.