

ур-ние неразрывности

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Здесь x и y — координаты, направленные вдоль поверхности тела и по нормали к ней, u и v — составляющие скорости вдоль этих координат, ρ — плотность, p — давление, μ — коэф. динамич. вязкости, T — темп-ра, c_p — уд. теплоёмкость при пост. давлении, λ — коэф. теплопроводности.

Граничные условия к системе ур-ний (1) — (3) имеют вид:

$$\text{при } y = 0 \text{ величины } u = 0, v = v_w, T = T_w;$$

$$\text{при } y \rightarrow \infty \text{ } u \rightarrow u_1, T \rightarrow T_1.$$

В случае смеси газов, в к-рой могут протекать хим. реакции, к ур-ниям (1) — (3) добавляются ур-ния неразрывности для отд. компонент

$$\rho u \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (\rho c_i V_i) + w_i \quad (i=1, 2, \dots, N-1), \quad (4)$$

а ур-ние сохранения энергии удобнее записывать через энтальпию H газа

$$\rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + u \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left[\sum_i \rho c_i V_i (H_i - h_i^0) \right], \quad (5)$$

где c_i — массовая концентрация i -й компоненты, V_i — скорость диффузии, w_i — массовая скорость образования i -й компоненты в единице объёма в результате хим. реакций, H_i — энтальпия i -й компоненты и h_i^0 — тепло образования i -й компоненты при стандартных условиях. Скорость диффузии определяется градиентами концентраций отд. компонент (концентрац. диффузия), а также градиентом темп-ры (термодиффузия).

Для решения ур-ний П. с. используются разл. методы, среди к-рых можно выделить две осн. группы — численные (конечно-разностные) и интегральные. Первая группа методов основана на численном интегрировании исходных ур-ний П. с. методом сеток, или конечных разностей. Совр. ЭВМ позволяют это делать практически без внесения существенных упрощающих предположений, с учётом всех особенностей геометрии, физ.-хим. процессов и т. п. Широкое распространение в численных расчётах получил анализ ур-ний П. с. для разл. частных случаев, когда, вводя спец. переменные и опуская нек-рые несущественные члены, с одной стороны, получают упрощение исходной системы ур-ний, а с другой — сами результаты получают в более обобщённом виде. К ним относятся разл. автоматические решения, для к-рых имеет место понижение размерности задачи (напр., случаи П. с. на плоской пластине и конусе, в окрестности критич. точки затуплённого тела, на клиновидных телах в дозвуковом потоке). См. *Автоматическое течение*.

Вторая группа методов основана на использовании ур-ний П. с. в интегральной форме. В этих ур-ниях в качестве зависимых переменных выступают нек-рые интегральные характеристики П. с.: толщина втеснения

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{\rho u}{\rho_1 u_1} \right) du, \quad (6)$$

толщина потери импульса

$$\delta^{**} = \int_0^\delta \frac{\rho u}{\rho_1 u_1} \left(1 - \frac{u}{u_1} \right) du, \quad (7)$$

толщина потери энергии

$$\delta^{***} = \int_0^\delta \frac{\rho u}{\rho_1 u_1} \left(\frac{H_{01} - H_0}{H_{01} - H_w} \right) du \quad (8)$$

(индексы «1» относятся к внеш. потоку, «01» — к границе П. с., «0» — к П. с., а «w» — к обтекаемой поверхности). Интегральные ур-ния П. с. получаются из дифференц. ур-ний типа (1) — (5) интегрированием последних по поперечной координате от 0 до внеш. границы П. с.

$$\frac{d}{dx} (\rho_1 u_1^2 \delta^{**}) + \rho_1 u_1 \frac{du_1}{dx} \delta^* = \tau_w, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dx} [\rho_1 u_1 (H_{01} - H_w) \delta^{***}] = q_w, \quad (10)$$

где τ_w — напряжение трения на поверхности тела, а q_w — тепловой поток через его поверхность. Интегральные ур-ния позволяют учесть изменяющиеся условия течения вверх по потоку от рассматриваемой точки тела.

Для решения интегральных ур-ний П. с. (9) — (10) необходимо иметь сведения о профиле скорости и энтальпии (или темп-ры) внутри П. с. В основе разл. приближённых методов решения ур-ний П. с. лежит использование нек-рых наборов профилей скорости и темп-р внутри П. с., напр. степенные профили. Знание профилей скорости и темп-ры позволяет связать между собой разл. характерные толщины П. с., входящие в ур-ния (9) — (10).

Турбулентный П. с. По мере увеличения расстояния вдоль поверхности тела местное число Рейнольдса возрастает и начинает проявляться неустойчивость ламинарного течения по отношению к малым возмущениям. Такими возмущениями могут служить пульсации скорости во внеш. набегающем потоке, шероховатость поверхности и др. факторы. В результате ламинарная форма течения переходит в турбулентную, при этом на главное «осреднённое» движение жидкости или газа в продольном направлении накладываются хаотич., пульсационные движения отд. жидких конгломератов в поперечном направлении. В результате происходит интенсивное перемешивание жидкости, вследствие чего интенсивность переноса в поперечном направлении кол-ва движения, теплоты и массы резко увеличиваются. Потеря устойчивости и переход к турбулентному режиму течения внутри П. с. происходят при нек-ром характерном числе Рейнольдса, к-рое наз. критическим. Величина $Re_{кр}$ зависит от мн. факторов — степени турбулентности набегающего потока, шероховатости поверхности Ma числа M внеш. потока, относит. темп-ры поверхности, вдува или отсоса вещества через поверхность тела и др. Поскольку переход ламинарного режима течения в турбулентный связан с потерей устойчивости, то сам этот процесс не является достаточно стабильным, вследствие чего имеет место «перемежаемость» режима течения в пределах нек-рой области, к-рую называют областью перехода.

Изменение режима течения в П. с. сопровождается утолщением слоя и деформацией профилей скорости, темп-ры и концентраций. Одновременно возрастают коэф. поверхностного трения, тепло- и массообмена, а также изменяется характер их распределения вдоль поверхности тела (рис. 4).

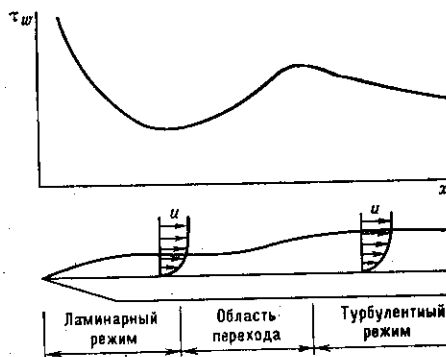


Рис. 4. Изменение режима течения в пограничном слое и поверхностного трения на плоской пластине.