УДК 533.6.011

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИМ. Н.Э.БАУМАНА

Голубев А.Г., Калугин В.Т., Луценко А.Ю., Столярова Е.Г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Москва, 2010

<u>Цель работы</u>: экспериментально определить профиль скорости и толщину пограничного слоя на плоской пластине, обтекаемой дозвуковым потоком, рассчитать толщины вытеснения и потери импульса, а также коэффициенты трения на поверхности пластины; провести сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов.

ВВЕДЕНИЕ

Движение реального газа существенным образом отличается от течения идеальной среды наличием вязкостных сил (сил внутреннего трения), обусловленных перераспределением количества движения и возникающих как реакции газа на изменение его формы, происходящее в процессе движения. Величина этих сил зависит от кинематических условий процесса и может меняться в широких пределах в зависимости от рода среды и ее термодинамического состояния (в основном, температуры) [1].

Непрерывное изменение скорости сохраняется вплоть до обтекаемой поверхности, причем частицы среды, непосредственно примыкающие к ней, неподвижны, т.е. на обтекаемой поверхности обращаются в ноль не только нормальная (условия непроницаемости поверхности), но и тангенциальная составляющая скорости (так называемое условие прилипания вязкой среды). По мере удаления от поверхности тела скорость непрерывно возрастает от значения, равного нулю, до значений, соответствующих представлению о свободно двигающемся газе. Следует отметить, что скорость увеличивается весьма интенсивно и уже на небольшом расстоянии от поверхности достигает своего конечного значения. В этой области, области резкого изменения скорости, существенное влияние на течение оказывают вязкостные силы.

Согласно закону Ньютона, напряжение трения в вязкой среде (например, для ламинарного режима течения)

$$\tau = \mu \frac{\partial V_x}{\partial y},$$

где μ - динамическая вязкость среды; $\partial V_x / \partial y$ – градиент продольной скорости в направлении, перпендикулярном рассматриваемой площадке.

Следовательно, при резком изменении скорости в направлении, нормальном к обтекаемой поверхности, т.е. при больших значениях $\partial V_x / \partial y$, могут возникнуть значительные силы трения даже в газах, обладающих малой вязкостью.

Если сопоставить реальную картину течения с ее идеализированной схемой, то можно заметить, что различия между ними, обусловленные особенностями представления о невязкой среде, сосредоточены в очень узкой (при больших числах Рейнольдса) области, непосредственно прилегающей к поверхности обтекаемого тела. Вне этой области идеализация свойств газа не вызывает искажений действительных условий процесса, и упрощенная схема течения находится в хорошем соответствии со своим сложным прообразом.

В соответствии с изложенным, вся область течения рассматривается как совокупность некоторого пограничного слоя и внешнего потока (рис. 1).

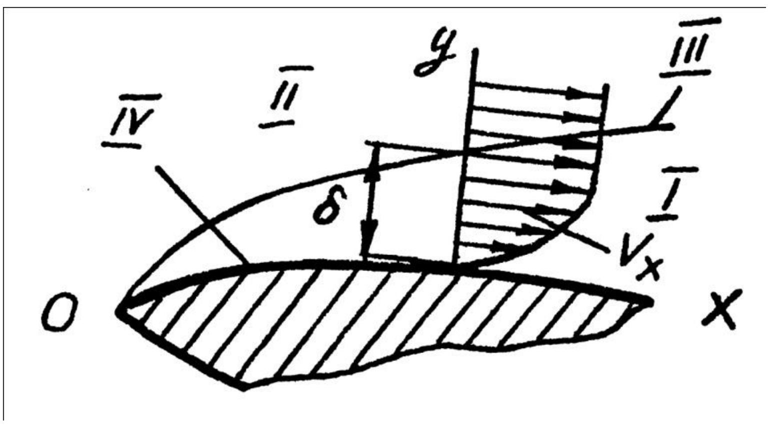

Рис. 1. Схема пограничного слоя

I - пограничный слой; II - внешнее течение;

III - граница пограничного слоя; IV - обтекаемая поверхность

Пограничным слоем называют зону течения вблизи поверхности тела, которая характеризуется высокой степенью неоднородности параметров потока (в частности, скорости), а следовательно, значительной интенсивностью вязкостных сил. В пределах этой зоны инерционные и вязкостные силы должны рассматриваться как величины одного порядка.

При исследовании течения газа в пограничном слое используется следующая система координат: ось Ох направлена вдоль поверхности тела, ось Оу – по нормали к этой поверхности. Толщина пограничного слоя δ измеряется по нормали к обтекаемой поверхности и представляет собой расстояние от стенки до границы пограничного слоя.

Внешний поток – это остальная область течения (рис. 1), в пределах которого можно пренебречь вязкостными силами (вследствие малости ${\partial V_x}/{\partial y}$) и воспользоваться при определении параметров потока в этой области системой уравнений идеальной среды.

В пределах пограничного слоя по мере удаления от поверхности влияние внутреннего трения ослабевает, соответственно изменяется и распределение скорости и совершается плавный переход к условиям, характерным для внешнего потока.

Задача по исследованию обтекания тела сводится к рассмотрению двух самостоятельных задач (о движении реальной среды в пограничном слое и идеальной – во внешнем потоке), которые объединяются в одно целое тем, что полученные решения должны быть согласованы таким образом, чтобы на границе пограничного слоя они плавно переходили одно в другое.

Отметим, что движение во внешнем потоке исследуется с использованием упрощенной системы уравнений, не содержащих вязкостных сил. Полные уравнения привлекаются лишь для исследования течения газа в пограничном слое, т.е. в пределах области малой протяженности, что является основой для существенных упрощений.

1. Уравнения пограничного слоя

Рассмотрим плоское течение несжимаемой среды вдоль поверхности малой кривизны. В этом случае система уравнений движения и неразрывности имеет следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial V_x}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}&=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\upsilon\left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}\right),\\ \frac{\partial V_y}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_y}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_y}{\partial y}&=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\upsilon\left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2}\right),\\ \frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}&=0.\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

В дальнейшем будем оценивать порядки величин членов, входящих в уравнения (1), поэтому целесообразно привести эти уравнения к безразмерной форме, так как в безразмерном представлении возможно количественное сопоставление различных величин вне зависимости от их физической природы.

Масштабы отнесения координат и скоростей для приведения их к безразмерному виду заданы условиями задачи в виде характерного размера L и скорости невозмущенного потока V_∞. Для времени и давления характерными величинами являются соответственно комплексы L/V_∞, ρV_∞^2, имеющие эквивалентные рассматриваемым величинам размерности.

Итак, безразмерные переменные представляются в виде

$$x'=x/L;\ y'=y/L;\ V_x'=V_x/V_\infty;\ \ V_y'=V_x/V_\infty;$$

$$t = {t}\Big/\left({L}/{V_\infty}\right); \; p' = {p}/{(\rho V_\infty^2)}.$$

Подставим в уравнения выражения для переменных и будем оценивать порядок их величин на основании следующих правил.

Если изменение некоторой переменной *x* ограничено интервалом (0,x_0), то говорят, что переменная х определена как величина порядка x_0, что записывается в виде $O(x) = x_0$, где О (латинское ordo – порядок) – символ порядка значения данной величины.

Порядок произвольной величины определяется следующим образом:

$$O\left(\frac{d^m y}{dx^m}\right) = \frac{y_0}{x_0^m}.$$

После проведения оценки порядка каждого члена уравнений движения и неразрывности и сравнения их порядков можно сделать следующие выводы: в пределах пограничного слоя продольные протяженности и скорости представляют собой величины, существенно большие поперечных, и течение в пограничном слое с хорошим приближением воспроизводится движением, определяемым составляющей скорости V_x; толщина пограничного слоя является величиной малой по сравнению с размерами тела только в случае больших чисел Рейнольдса; в пределах пограничного слоя распределение статического давления подчиняется следующей зависимости $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$, что указывает на то, что в пределах любого сечения пограничного слоя давление постоянно и является внешний поток. При этом внешнее течение можно описывать функцией лишь продольной координаты *x* и времени t, т.е. $p = f(x, t)$.

В окончательном виде полученную систему уравнений динамического пограничного слоя можно записать в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x\frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y\frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \upsilon\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2};\\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0.\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Система уравнений (2) содержит три неизвестных величины $\left(V_{x,}, V_y, p\right)$ и является незамкнутой. Эта неопределенность устраняется следующим образом. Поскольку толщина пограничного слоя очень мала и смещение линий тока, происходящее вследствие вязкости среды, в направлении, перпендикулярном обтекаемой поверхности, весьма незначительно, можно считать в большинстве случаев справедливой гипотезу об отсутствии обратного влияния пограничного слоя на внешний поток. При этом внешнее течение можно отожествлять с движением идеальной среды вдоль рассматриваемой поверхности, что позволяет находить параметры невязкого потока на стенке (y = 0), которые принимаются в дальнейшем равными параметрам на границе пограничного слоя. Следовательно, давление можно считать известной функцией, что допустимо лишь при отсутствии обратного влияния пограничного слоя.

Давление р оказывается связанным простой зависимостью со скоростью V_δ на границе пограничного слоя, т.е. со скоростью невязкого потока. Действительно, записав первое уравнение системы (2) для условий идеальной среды, найдем:

$$\frac{\partial V_\delta}{\partial t} + V_\delta\frac{\partial V_\delta}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x},$$

где V_δ скорость среды во внешнем потоке.

В соответствии с этим систему уравнений (2) можно записать в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial V_x}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}=\frac{\partial V_\delta}{\partial t}+V_\delta\frac{\partial V_\delta}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2};\\ \frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}=0.\end{aligned}\right\}\qquad(3)$$

Система уравнений (3) является замкнутой, т.к. содержит лишь две неизвестные величины V_x, V_y, она должна быть дополнена граничными и начальными условиями.

Граничные условия должны выражать условие «прилипания» жидкости к поверхности, а также удовлетворять требованию плавного перехода продольной составляющей скорости V_x в скорость внешнего потока, т.е

$$V_x = V_y = 0 \quad \text{при} \quad y = 0; \qquad V_x \to V_\delta \quad \text{при} \ y \to \infty. \qquad (4)$$

Начальные условия, имеющие смысл только для неустановившихся течений, должны быть заданы в виде распределения скоростей V_x, V_y в начальный момент. Для стационарных течений система уравнений (3) приводится к виду:

$$\left.\begin{aligned}V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}=V_\delta\frac{\partial V_\delta}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2};\\ \frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}=0.\end{aligned}\right\}$$

Интегрирование этой системы с граничными условиями (4) затруднительно, и довести решение до конечного результата удается лишь для некоторых частных случаев распределение скорости во внешнем потоке. В соответствии с этим в теории пограничного слоя широкое распространение получили приближенные методы, основанные на использовании интегральных соотношений.

Следует заметить, что общая теория пограничного слоя включает в себя наряду с учением о движении среды в «чистом» виде (рассмотренный выше процесс внешнего обмена количеством движения) также учение о теплообмене и массообмене. В зависимости от физической природы процесса различают динамический, тепловой и диффузионный пограничные слои.

2. Интегральное соотношение пограничного слоя

Интегральное соотношение имеет важное практическое значение в приближенной теории пограничного слоя. Для вывода этого соотношения поступим следующим образом.

Выделим в пограничном слое бесконечно малый элемент слоя *ABCD* единичной ширины, ограниченный твердой поверхностью *AD*, внешней границей пограничного слоя *BC* и отрезками *AB* и *CD*, нормальными к обтекаемой поверхности (рис. 2).

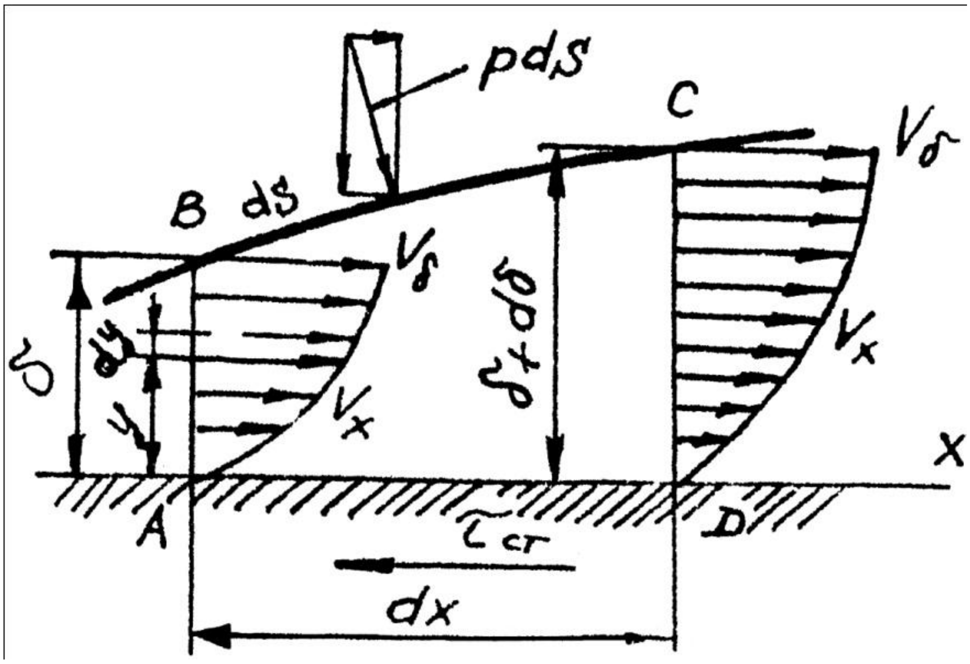

Рис. 2 Контрольный объём пограничного слоя

Рассмотрим установившееся течение и в основу вывода положим теорему об изменении количества движения (уравнение движения).

Количество движения среды, вносимое в контрольный объем в единицу времени через элементарную площадку единичной ширины и высотой *dy*, равно $\rho V_x^2 dy$. Следовательно, потоки количества движения, проходящие в единицу времени через грани *AB* и *CD* элемента пограничного слоя, определяются соответственно следующими соотношениями:

$$\int_0^\delta \rho V_x^2 dy \text{ и } \int_0^\delta \rho V_x^2\, dy + \frac{\partial}{\partial x}\left(\int_0^\delta \rho V_x^2\, dy\right) dx.$$

Для вычисления количества движения газа, вносимого в контрольный объем через внешнюю границу пограничного слоя, необходимо предварительно определить его массу, которая поступает в указанный объем через эту границу. Эта масса газа находится как разность потоков массы, проходящей через грани *CD* и *AB* в единицу времени, т.е.

$$\int_0^\delta \rho V_x\, dy + \frac{\partial}{\partial x}\left(\int_0^\delta \rho V_x dy\right) dx - \int_0^\delta \rho V_x dy \;=\; \frac{\partial}{\partial x}\left(\int_0^\delta \rho V_x dy\right) dx.$$

В соответствии с этим количество движения, вносимое в элемент пограничного слоя *BC*, определяется выражением

$$V_\delta \frac{\partial}{\partial x}\left(\int_0^\delta \rho V_x\, dy\right) dx.$$

Согласно классической механике изменение количества движения газа, протекающего через выделенный элемент пограничного слоя, должно быть равно импульсу сил, действующих по граням этого элемента в направлении оси *x*.

Эти импульсы сил соответственно для граней *AB*, *BC*, *CD*, *AD* вычисляются в виде $p\delta$; $pd\delta$; $p\delta + {}^{\partial}/_{\partial x}\,(p\delta)dx$; $\tau_{\text{ст}} dx$.

Итак найдем:

$$\int_0^\delta \rho V_x^2 dy + \frac{\partial}{\partial x}\left(\int_0^\delta \rho V_x^2\, dy\right) dx -$$
$$-\int_0^\delta \rho V_x^2 dy - V_\delta \frac{\partial}{\partial x}\left(\int_0^\delta \rho V_x dy\right) dx =$$
$$= p\delta + \delta d\delta - \left[p\delta + \frac{\partial}{\partial x}(p\delta) dx\right] - \tau_{\text{ст}} dx$$

или после элементарных преобразований для рассматриваемых условий получаем

$$\frac{d}{dx}\int_0^\delta \rho V_x^2 dy - V_\delta \frac{d}{dx}\int_0^\delta \rho V_x dy = -\tau_{\text{ст}} - \delta \frac{dp}{dx}. \qquad (5)$$

Это и есть одна из форм записи интегрального соотношения импульсов для пограничного слоя.

Для несжимаемого газа ($\rho = const$) соотношение (5) записывается в виде:

$$\frac{d}{dx}\int_0^\delta V_x^2 dy - V_\delta \frac{d}{dx}\int_0^\delta V_x dy = -\frac{\tau_{\text{ст}}}{\rho} - \frac{\delta}{\rho}\frac{dp}{dx}. \qquad (6)$$

Это уравнение содержит три неизвестные величины (δ; $\tau_{\text{ст}}$; $V_x(y)$) и для его решения необходимо привлечь дополнительные соотношения.

3. Условные толщины пограничного слоя

После несложных преобразований интегрального соотношения (5) можно выделить два интеграла: $\int_0^\delta (\rho_\delta V_\delta - \rho V_x) dy$, $\int_0^\delta \rho (V_\delta V_x - V_x^2) dy$.

Величина $\int_0^\delta \rho_\delta V_\delta\, dy = \rho_\delta V_\delta \delta$ представляет собой расход газа в единицу времени через сечение пограничного слоя, подсчитанный по параметрам внешнего (невязкого) потока; $\int_0^\delta (\rho V_x) dy$ характеризует действительный расход газа через то же сечение пограничного слоя δ.

Следовательно, $\int_0^\delta(\rho_\delta V_\delta - \rho V_x)dy$ представляет собой уменьшение (по сравнению с невязким потоком) расхода газа через сечение пограничного слоя, обусловленное вязкостью среды.

Составим следующее выражение

$$\delta^* = \frac{\int_0^\delta(\rho_\delta V_\delta - \rho V_x)dy}{\rho_\delta V_\delta} = \int_0^\delta \left(1 - \frac{\rho V_x}{\rho_\delta V_\delta}\right) dy.$$

Величина δ^*, имеющая линейную размерность, называется в соответствии с ее физическим смыслом, *толщиной вытеснения* и представляет собой площадку, через которую в невязком потоке протекает количество среды, равное потере расхода через пограничный слой из-за торможения газа в реальном течении.

Для несжимаемого газа

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{V_x}{V_\delta}\right) dy.$$

Толщина вытеснения δ^* характеризует смещение линий тока в направлении, перпендикулярном обтекаемой поверхности.

Рассмотрим второй представленный интеграл. Аналогично рассуждая, можно установить, что этот интеграл характеризует уменьшение количества движения газа, протекающего через сечение пограничного слоя:

$$\delta^{**} = \frac{\int_0^\delta \rho(V_\delta V_x - V_x^2)dy}{\rho_\delta V_\delta^2} = \int_0^\delta \frac{\rho V_x}{\rho_\delta V_\delta} \left(1 - \frac{V_x}{V_\delta}\right) dy.$$

Величина δ^{**} представляет высоту площадки, через которую в условиях течения идеальной среды в единицу времени переносится количество движения, равное количеству движения, потерянному вследствие торможения среды в пограничном слое. В соответствии с этим δ^{**} называется *толщиной потери импульса*. Для несжимаемой среды δ^{**} (ρ = const) получим

$$\delta^{**} = \int_0^\delta \frac{V_x}{V_\delta}\left(1 - \frac{V_x}{V_\delta}\right) dy.$$

4. Приближенные методы расчета пограничного слоя

Приближенные методы расчета пограничного слоя основаны на использовании интегрального соотношения импульсов. Сущность этих методов состоит в том, что распределение скорости по сечениям пограничного слоя представляется функциями, которые задаются, а не получаются как результат интегрирования дифференциальных уравнений пограничного слоя. Выбор функций обусловлен соответствующими соображениями, порой достаточно тонкими и сложными.

Ламинарный пограничный слой. При течении вдоль плоской пластины профиль скорости и давление не зависят от координаты x ($^{dp}/_{dx} = 0$; $^{dV_\delta}/_{dx} = 0$). Примем, что на пластине существует однородный пограничный слой – ламинарный, и он начинается с носка пластины.

Тогда интегральное соотношение выглядит следующим образом:

$$\frac{d}{dx}\int_0^\delta (V_x V_\delta - V_x^2) dy = \frac{\tau_{\text{ст}}}{\rho}. \tag{7}$$

Функцию, аппоксимирующую распределение скорости по толщине пограничного слоя, можно представить в виде полинома третьей степени:

$$V_x = a + by + cy^2 + dy^3.$$

Коэффициенты *a*, *b*, *c*, *d* определяются из граничных условий:

1. $y = 0 \rightarrow V_x = V_y = 0;$

2. $y = 0 \;\rightarrow\; \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} = 0;\;\; \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \upsilon \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2};\; V_x = V_y = 0;\; \frac{\partial p}{\partial x} = 0\right)$

3. $y = \delta \;\rightarrow\; \tau_{\text{ст}} = \mu \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0; \;\rightarrow\; \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0;$

4. $y = \delta \;\rightarrow\; V_x = V_\delta.$

Профиль скорости в безразмерном виде имеет следующий вид:

$$\frac{V_x}{V_\delta} = \frac{3}{2}\frac{y}{\delta} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right)^3.$$

Решая интегральное соотношение (7), получаем следующие зависимости [1]:

$$\delta^{\text{л}} = 4{,}64 \frac{x}{\sqrt{Re_x}};\;\; \tau_{\text{ст}} = \frac{0{,}323\, \rho V_\delta^2}{\sqrt{Re_x}};\;\; c_{fx}^{\text{л}} = \frac{0{,}646}{\sqrt{Re_x}};\;\; c_f^{\text{л}} = \frac{1{,}3}{\sqrt{Re_L}}.$$

(L – характерный линейный размер).

Турбулентный пограничный слой. Считаем, что на пластине, начиная с передней кромки, развивается турбулентный пограничный слой. При расчете параметров турбулентного пограничного слоя может быть использован степенной закон распределения скорости по толщине слоя:

$$\frac{V_x}{V_\delta} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{\bar{k}}},$$

где $\bar{k} = 7$, а связь между $\tau_{\text{ст}}$, δ, V_∞ (V_δ) взята из данных о движении жидкости по круглой трубе:

$$\tau_{\text{ст}} = 0{,}0225\, \rho V_\delta^2 \left[\frac{\upsilon}{V_\delta \delta}\right]^{\frac{1}{4}}.$$

В результате решения интегрального соотношения типа (7) находим:

$$\delta^{\text{т}} = \frac{0{,}37x}{\sqrt[5]{Re_x}};\;\; c_{fx}^{\text{т}} = \frac{0{,}0578}{\sqrt[5]{Re_x}};\;\; c_f^{\text{т}} = \frac{0{,}074}{\sqrt[5]{Re_L}}.$$

Сравнение зависимостей для ламинарного и турбулентных слоев на плоской пластине показывает, что в турбулентном слое:

- эпюра продольных скоростей является более наполненной;

- толщина слоя по длине пластины возрастает интенсивнее;

- сопротивление трения значительно больше, чем в ламинарном.

Смешанный пограничный слой. Приступая к расчету пограничного слоя, необходимо прежде всего проанализировать характер этого слоя на обтекаемой поверхности, который зависит от режима обтекания, определяемого числом Рейнольдса [1]. В носовой части тела образуется ламинарный пограничный слой, затем следует некоторая область перехода ламинарного слоя в турбулентный и, наконец, полностью развитый турбулентный пограничный слой.

Часто при решении практических задач можно исходить из того, что ламинарный пограничный слой отделен от турбулентного областью перехода с бесконечно малыми размерами. Иными словами, можно считать, что переход одной формы течения в другую происходит мгновенно при $x_{\text{кр}} = x_{\text{п}}$ (рис. 3).

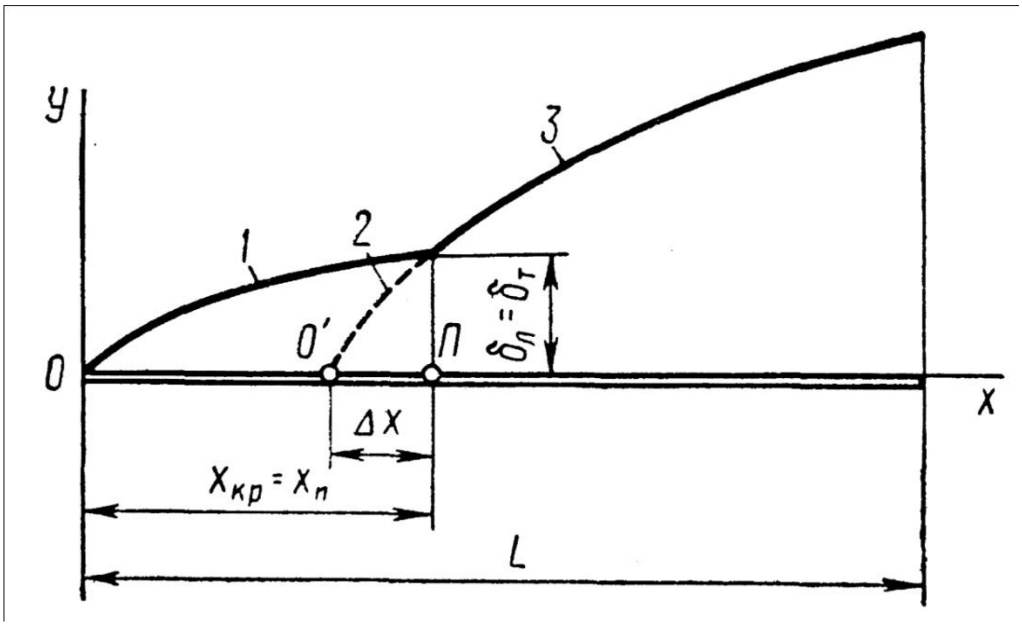

Рис. 3. Схема перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный:

1- ламинарный пограничный слой;
2- фиктивный участок турбулентного пограничного слоя;
3- турбулентный пограничный слой за точкой перехода

Координата этой точки перехода определяется по *критическому числу Рейнольдса* $Re_{кр}$, которое зависит от многих факторов (числа Маха M_∞, температурного фактора ${T_{ст}}/{T_\delta}$, шероховатости поверхности, начальной степени турбулентности потока, градиента давления и т.п.). В приближенных расчетах в случае обтекания плоской пластины при дозвуковых скоростях потока принимают $Re_{кр} = 4{,}5 \cdot 10^5$, а при сверхзвуковых - $Re_{кр} = (2 \dots 5) \cdot 10^6$.

Расчет смешанного пограничного слоя проводится следующим образом. На участке пластины от передней кромки до точки П (рис. 3) параметры вязкого обтекания (толщина слоя, коэффициент трения и др.) рассчитываются по соотношениям ламинарного пограничного слоя.

Для расчета турбулентного течения, начинающегося за точкой П, нельзя непосредственно применять приведенные ранее зависимости для турбулентного пограничного слоя, так как этой слой начинается не с нулевой толщины, а с какого-то конечного значения. Эти зависимости можно использовать, если входящую в них координату *x* отсчитывать от условного начала турбулентного пограничного слоя (точка O' на рис. 3)).

Согласно одной из схем определения положения точки O' принимается, что расстояние $\Delta x = \text{O}'\Pi$, равное длине условной пластины с турбулентным пограничным слоем, должно быть таким, чтобы обеспечить толщину турбулентного пограничного слоя $\delta_{\text{т}}$ в точке перехода, равную толщине ламинарного слоя $\delta_{\text{л}}$ в точке с координатой $x_{\text{кр}} = x_{\text{п}}$, т.е.

$$\delta_{\text{л.},x_{\text{кр}}} = \delta_{\text{т.},\Delta x}. \tag{8}$$

Толщины пограничных слоев рассчитываются по соответствующим формулам для ламинарного и турбулентного течений.

Таким образом, условие (8) позволяет рассчитать величину Δx, найти положение точки O' и определить все необходимые параметры турбулентного пограничного слоя.

5. Экспериментальное исследование параметров пограничного слоя

Методика измерений в пограничном слое. Теория движения невязкого газа дает удовлетворительную картину обтекания какой–либо поверхности только в идеальном потоке, расположенном за пределами пограничного слоя, непосредственно примыкающего к этой поверхности, где существенное значение приобретают силы вязкого трения.

На рис. 4 приведена схема такого пограничного слоя на плоской пластине, обтекаемой в продольном направлении. Поскольку изменение скорости пограничного слоя до ее значения во внешнем свободном потоке происходит асимптотически, то определение толщины пограничного слоя δ в известной степени произвольно. Условно за внешнюю границу пограничного слоя принимают линию, на которой скорость течения отличается от скорости в свободном потоке на 1%.

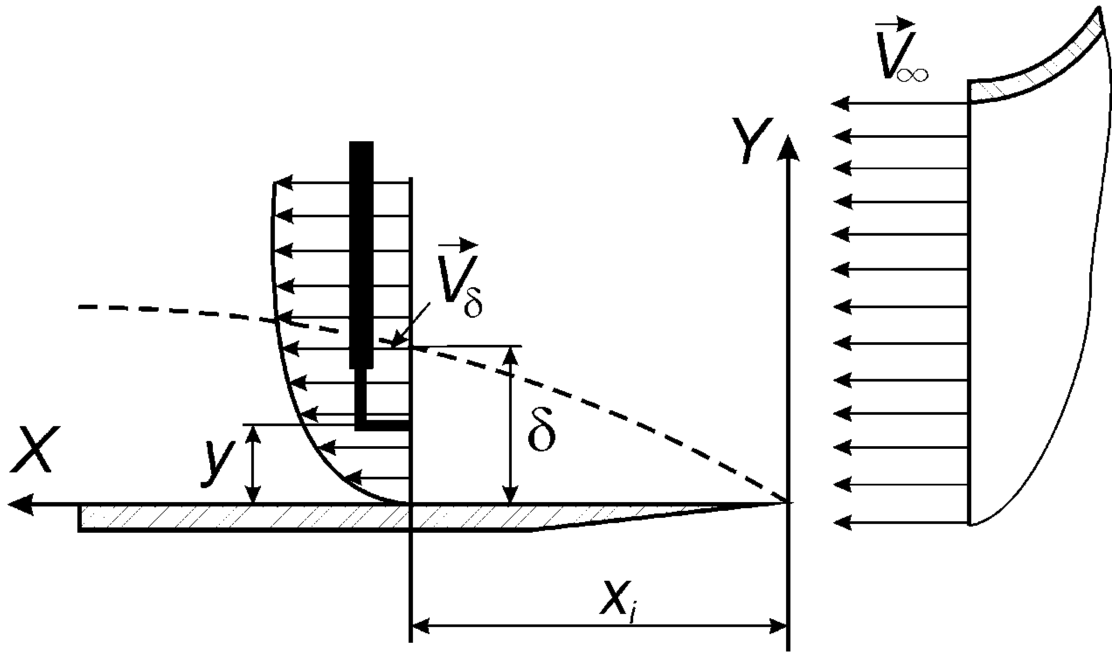

Рис. 4. Схема эксперимента

Изучение пограничного слоя связано с определением распределения по его толщине и длине продольных скоростей V_x, а также толщины слоя δ , условных толщин вытеснения и потери импульса, соответственно, δ^*, δ^{**} и коэффициентов трения. Давление в различных точках сечения пограничного слоя практически постоянно $\left({}^{\partial p}/_{\partial y} = 0\right)$, и его можно принять равным давлению p_δ на внешней границе этого слоя, что справедливо при условии, если толщина пограничного слоя мала по сравнению с поперечными размерами обтекаемого тела. Статическое давление p_δ равно его значению в набегающем невозмущенном потоке. При экспериментальных исследованиях пограничного слоя микронасадок полного напора (трубку Пито) закрепляют на координатнике, снабженном микрометрическим винтом, позволяющим измерять расстояние с точностью до 0,02 мм. Необходимо зафиксировать момент соприкосновения насадка полного давления с поверхностью пластины. Минимальное расстояние от этой поверхности до точки замера составляет половину поперечного размера приемного отверстия трубки Пито. При измерении в пограничном слое трубку полного напора перемещают при помощи координатника до тех пор, пока она не окажется в свободном потоке, т.е. за пределами пограничного слоя, о чем судят по прекращению изменений показаний микроманометра.

Распределение скорости по толщине пограничного слоя $V_x = f(y)$ при фиксированном x_i может быть найдено по измеренному в нем полному давлению $p_0^{'} = f(y)$. С этой целью воспользуемся уравнением Бернулли для элементарной струйки несжимаемой среды, из которого скорость V_x находится, как:

$$V_x = \sqrt{2 \cdot \frac{(p_0^{'} - p_\infty)}{\rho_\infty}}.$$

На основании экспериментальных зависимостей $V_x = f(y)$ можно определить толщину пограничного слоя δ, условные толщины вытеснения и потери импульса δ^*, δ^{**}. При этом толщина δ находится по эпюре скоростей $V_x = f(y)$, на которой отыскивается координата *y* = δ, соответствующей значению $V_x = 0{,}99V_\infty$. Условные толщины δ^*, δ^{**} определяются по известным формулам путем численного интегрирования:

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{V_x}{V_\delta}\right) dy; \qquad \delta^{**} = \int_0^\infty \frac{V_x}{V_\delta} \cdot \left(1 - \frac{V_x}{V_\delta}\right) dy.$$

Методика проведения испытаний. Экспериментальная установка для измерения полного давления в потоке аэродинамической трубы приведена на рис. 5.

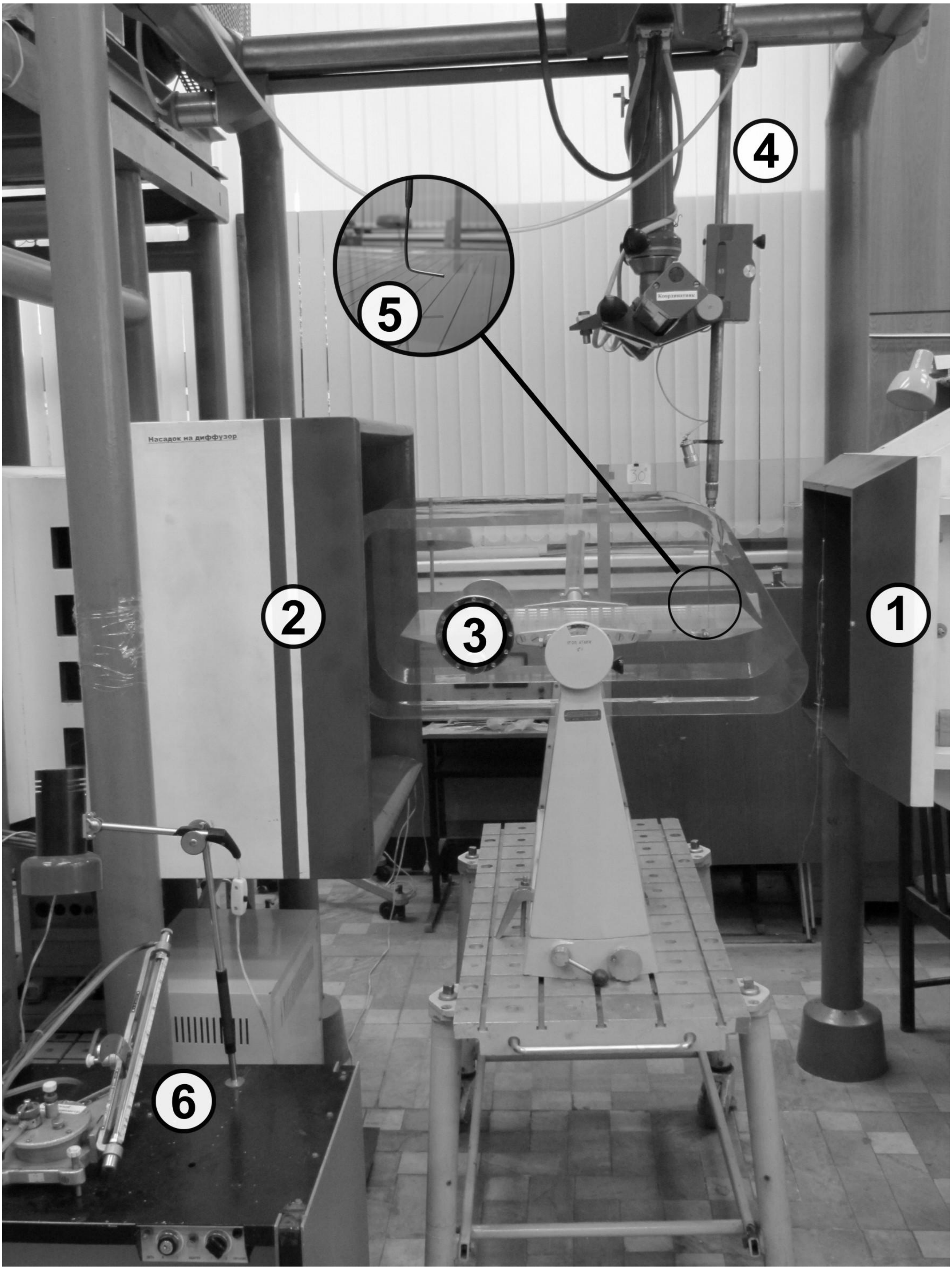

Рис 5. Экспериментальная установка с моделью и измерительным оборудованием

1 – сопло аэродинамической трубы;

2 – диффузор аэродинамической трубы;

3 – модель плоской пластины с боковыми шайбами;

4 – координатник для точного позиционирования измерительных насадков;

5 – трубка Пито, установленная на координатнике;

6 – чашечный микроманометр.

Над поверхностью плоской пластины установлен насадок полного давления, при помощи которого определяется разность давлений $(p_0^{'} - p\infty$. Избыточное давление определяют в соответствии с показаниями дифференциального манометра по формуле:

$$p_0^{'} - p_\infty = k_{\text{т}} \, \Delta h \, \gamma \, sin\beta,$$

где Δh - показания манометра в текущем сечении; γ – удельный вес жидкости, используемой в манометре; β – угол наклона плоскости манометрической трубки; $k_{\text{т}}$ - тарировочный коэффициент.

6. Порядок проведения работы

1. Ознакомиться со схемой аэродинамической дозвуковой установки и необходимой аппаратурой, предназначенной для проведения работы.

2. Установить модель плоской пластины в рабочей части аэродинамической трубы.

3. Выбрать сечения x_i по длине пластины, в которых будут проводиться измерения.

4. Расположить насадок полного давления, установленный на координатнике в конкретном сечении x_i над поверхностью пластины и

вращением микровинта перемещать его в вертикальном направлении с заданным шагом.

5. Для каждого фиксированного положения насадка зарегистрировать соответствующие показания манометра Δh;

6. Рассчитать по формулам значения $V_x = f(y, x)$; $\delta = f(x)$; $c_{f_x} = f(x)$; c_f; $\delta^* = f(x)$; $\delta^{**} = f(x)$ и занести результаты в таблицу.

7. Построить графические зависимости рассчитанных параметров пограничного слоя от координат y, x.

<u>Предлагаемый вариант таблиц.</u>

Таблица 1.

N	y	Δh	V_x	$\frac{V_x}{V_\delta}$	$1 - \frac{V_x}{V_\delta}$

Таблица 2.

x_i	δ	δ^*	δ^{**}	c_{f_x}

Список рекомендованной литературы:

1. Аэродинамика: учеб. пособие / [А.Г. Голубев и др.]; под ред. В.Т.Калугина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 687с.