

углов атаки изображены на рис. 3.34. (Заметим, что на практике часто откладывают по оси ординат — \bar{p} , ибо отрицательные значения коэффициента давления соответствуют, как правило, верхней части поверхности; однако мы не будем придерживаться этого способа.) Из этих диаграмм видно, что при движении тела в несжимаемой среде с малыми положительными углами атаки понижение давления (по сравнению с p_∞) на верхней части поверхности может быть значительно большим по абсолютной величине, чем повышение давления на нижней части поверхности. Следовательно, в этих условиях аэродинамическая подъемная сила тела происходит в основном от понижения давления (подсасывания) на верхней части поверхности, а не от повышения давления на нижней части поверхности. Необходимо отметить, что для сжимаемой среды это положение верно лишь при малых скоростях движения (по сравнению со скоростью звука). При сверхзвуковых скоростях движения роли верхней и нижней частей поверхности тела в образовании подъемной силы могут быть и одинаковыми.

Из этих диаграмм видно также, что при больших углах атаки распределение давлений по верхней части поверхности резко изменяется по сравнению с малыми углами атаки. Как будет выяснено в дальнейшем, это обстоятельство является результатом отрыва пограничного слоя и вихреобразования над верхней поверхностью, происходящих из-за резкого расширения потока в этом месте.

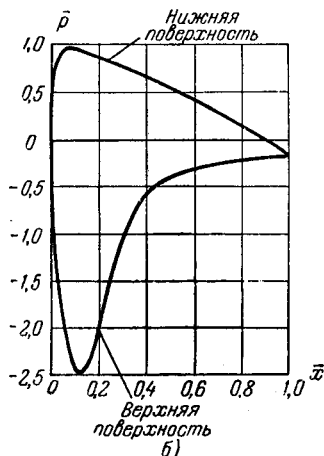
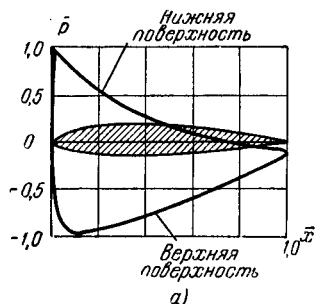


Рис. 3.34. Координатные диаграммы распределения давления при несимметричном обтекании тела несжимаемой средой:

а) углы атаки, при которых нет вихреобразования над верхней поверхностью тела; б) углы атаки, при которых образуются вихри над верхней поверхностью тела.

§ 10. Распределение касательных напряжений по поверхности удобообтекаемого тела

В авиационной и ракетной технике применяются главным образом тела малого сопротивления, называемые иначе удобообтекаемыми телами. Для таких тел при движении в несжимаемой среде с постоянной скоростью основной по величине составляющей сопротивления является сопротивление, происходящее от трения среды о поверхность тела, т. е. от касательных напряжений на поверхности.

Величина коэффициента касательного напряжения в данной точке поверхности тела зависит от координат этой точки, взятых в долях длины, от состояния поверхности, от числа Рейнольдса и других критериев динамического подобия.

Мы рассмотрим здесь лишь некоторые из этих зависимостей.

Число Рейнольдса определяет, как будет изложено в гл. VI, режим движения вязкой среды. Напомним, что число Рейнольдса характеризует соотношение между силами инерции и силами вязкости в данном потоке. Поэтому малым значениям числа Рейнольдса соответствуют течения, в которых основную роль играют силы вязкости, а большим значениям числа Рейнольдса — течения, в которых основную роль играют силы инерции.

При больших значениях числа Рейнольдса течение становится хаотическим, беспорядочным, неустановившимся. Такое течение жидкости, как известно, называется турбулентным.

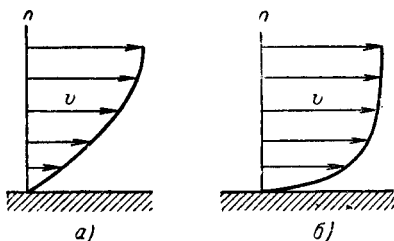


Рис. 3.35. Распределение скоростей по сечению потока вязкой жидкости вблизи поверхности неподвижного тела:

а) в случае ламинарного течения; б) в случае турбулентного течения.

Вследствие поперечного перемешивания частиц и их соударений, распределение скорости (средней по времени) по сечению потока при турбулентном движении оказывается значительно более равномерным, чем при ламинарном (рис. 3.35), а градиент скорости у поверхности тела большим по величине, чем при ламинарном течении.

При турбулентном течении энергия частиц расходуется не только на работу сил вязкости, но также и на соударения частиц и на их беспорядочное перемешивание; поэтому коэффициент потери энергии на трение и коэффициент касательного напряжения при турбулентном течении всегда больше, нежели при ламинарном (что видно также из распределения скоростей вблизи поверхности тела).

Представим себе теперь тонкое, удобообтекаемое, неподвижное тело, имеющее плоскость симметрии или ось симметрии, и поток несжимаемой среды, направленный вдоль этой плоскости или оси. Частицы среды, непосредственно прилегающие к поверхности тела, благодаря действию сил сцепления прилипают к поверхности, и их скорости равны нулю. При удалении от поверхности тела скорости частиц среды быстро нарастают, так как они скользят друг относительно друга. Образуется *тонкий слой, прилегающий к поверхности тела и состоящий из частиц, заторможенных действием сил вязкости; он называется пограничным слоем*. Толщина пограничного слоя, т. е. расстояние от поверхности тела до того места в потоке, где практически отсутствуют градиент скорости и связанное с ним касательное напряжение, изменяется вдоль сечения тела приблизительно так,

как представлено на схеме (рис. 3.36). Следует отметить, что толщина пограничного слоя непрерывно нарастает от носка тела до его хвоста, так как по пути потока у поверхности тела затормаживаются все новые массы жидкости. В связи с нарастанием характерного размера пограничного слоя — его толщины — увеличивается в направлении от носка к хвосту тела и число Рейнольдса

$$R_\delta = \frac{v\delta}{\nu},$$

где v есть скорость на внешней границе пограничного слоя, δ — его толщина, ν — кинематический коэффициент вязкости среды. В носовой части тела числа Рейнольдса R_δ малы, и поэтому движение среды в пограничном слое здесь всегда ламинарное. Когда R_δ достигает определенного для данных условий значения, называемого *критическим*

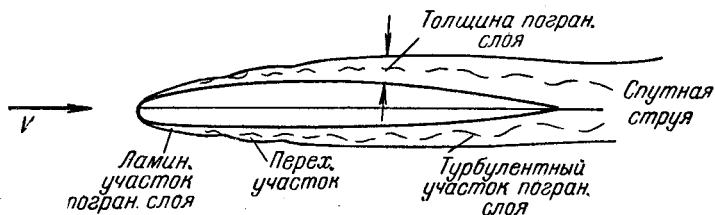


Рис. 3.36. Схема пограничного слоя при обтекании тонкого тела несжимаемой средой. Число Рейнольдса имеет значение, большее критического.

значением числа Рейнольдса, начинается переход ламинарного движения в турбулентное. Переходный участок пограничного слоя может занимать значительную часть длины тела. За переходным участком в области, где числа R_δ велики, расположен участок пограничного слоя с развитым турбулентным движением.

Движение среды вблизи носовой части поверхности тела более чувствительно ко всевозможным нарушениям, вызванным шероховатостью и волнистостью поверхности и надстройками на поверхности, чем движение в хвостовой части. В носовой части, где пограничный слой тонок, шероховатости и надстройки на поверхности могут, даже при небольшой их высоте, оказаться вне пограничного слоя и вызвать вихреобразование. Кроме того, будучи внутри ламинарного слоя, они нарушают слоистое течение в слое, являются источником возмущений, из-за которых ламинарное движение переходит в турбулентное. Поэтому носовая часть тела (примерно $\frac{1}{3}$ по длине сечения тела) должна иметь более гладкую поверхность, чем это может быть допущено для хвостовой части.

Распределение касательных напряжений на поверхности тела по длине его сечения представлено на рис. 3.37. В пределах ламинарного участка пограничного слоя коэффициент касательного напряжения τ убывает вдоль контура сечения тела, за исключением небольшой

области вблизи критической точки. Причиной убывания $\bar{\tau}$ является нарастание толщины пограничного слоя и связанное с этим уменьшение градиента скорости dv/dn . В переходном участке, где ламинарное движение сменяется турбулентным, касательные напряжения значительно увеличиваются. В пределах турбулентного участка пограничного слоя $\bar{\tau}$ вновь убывает вдоль контура продольного сечения тела по той же причине, что и для ламинарного участка.

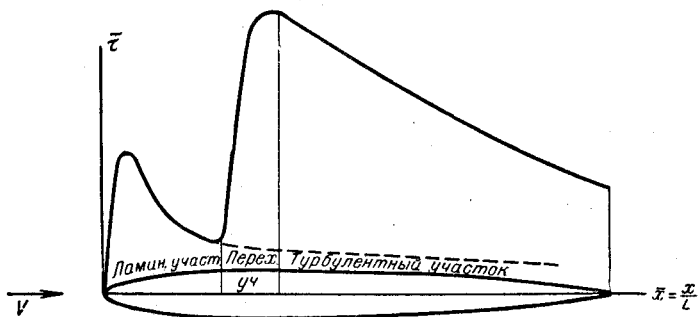


Рис. 3.37. Примерное распределение касательного напряжения по длине сечения тонкого, симметрично обтекаемого тела. Число Рейнольдса больше критического значения.

Если бы удалось искусственно задержать переход в пограничном слое ламинарного течения в турбулентное, то касательные напряжения в переходном и турбулентном участках слоя резко уменьшились бы. Распределение касательных напряжений выглядело бы, как показано на рис. 3.37 пунктирной линией. Соответственно уменьшилось бы сопротивление трению поверхности тела. Расчеты показывают, что при больших значениях числа Рейнольдса, когда ламинарный участок пограничного слоя занимает лишь незначительную часть поверхности тела, при замене турбулентного движения ламинарным произошло бы уменьшение сопротивления трению в десятки раз. До недавнего времени идея уменьшения силы трения жидкой среды о поверхность тела казалась практически неосуществимой. Однако в настоящее время уже разработан ряд практических способов ламинаризации течения в пограничном слое, которые позволяют значительно снизить сопротивление удообообтекаемого тела (см. гл. VII).

§ 11. Аэродинамическая сила и аэродинамический момент; их составляющие по осям координат

Мы рассмотрим теперь вопрос о суммарном сопротивлении жидкой или газообразной среды при движении в ней тела.

Представим себе тело, движущееся в среде произвольным образом. Воздействие среды на тело сводится к силам, непрерывно распределенным по всей поверхности тела; эти поверхностные аэродина-