

пограничный слой на заданном контуре (см. предыдущий параграф), вычислить сумму

$$f + \gamma R_0^{\frac{3}{2}},$$

находящуюся в левой части формулы (7.50), и найти точку на контуре, в которой эта сумма имеет значение $-0,0681$, характерное для f в точке отрыва слоя.

Обработка опытных данных и расчеты по изложенному способу показывают, что для каждого данного контура точка перехода с возрастанием числа Рейнольдса перемещается против потока, асимптотически приближаясь к некоторой точке, зависящей от формы данного контура.

§ 17. Влияние перехода ламинарного движения в пограничном слое в турбулентное на местоположение точки отрыва слоя

При малых значениях числа Рейнольдса пограничный слой на всем протяжении ламинарен, вплоть до точки отрыва. После отрыва пограничный слой, двигаясь против нарастающего давления в окружающую среду, быстро турбулизируется. Точка перехода ламинарного движения в турбулентное находится здесь за точкой отрыва.

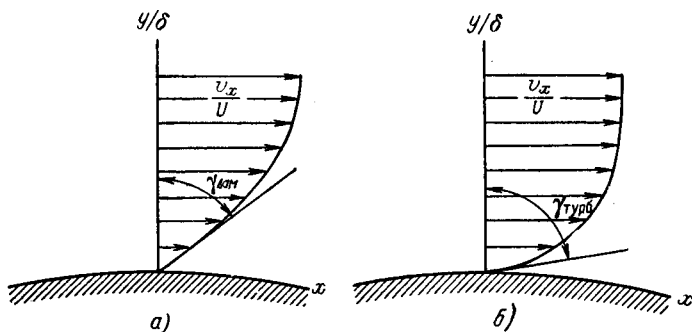


Рис. 7.46. Типичное распределение безразмерной скорости v_x/U в пограничном слое при ламинарном (а) и при турбулентном (б) движении. Градиент скорости на поверхности тела, характеризующийся углом γ , при турбулентном движении больше, нежели при ламинарном: $\gamma_{турб} > \gamma_{лам}$.

При возрастании числа Рейнольдса точка перехода приближается к точке отрыва и, наконец, совмещается с ней. Появление на поверхности тела участка турбулентного пограничного слоя сопровождается резким перемещением точки отрыва слоя вдоль по потоку; при этом точка перехода располагается перед точкой отрыва.

Причина перемещения точки отрыва слоя заключается в том, что при переходе ламинарного движения в турбулентное градиент скорости у поверхности тела, а следовательно, и касательное напряжение τ_0 резко увеличиваются (рис. 7.46). Точка отрыва слоя, как известно (§ 13), характеризуется тем, что в ней $(\partial v_x / \partial y)_{y=0}$ или, что все равно, $\tau_0 = 0$. Имея начальное значение $(\partial v_x / \partial y)_{y=0}$ или τ_0 большим при турбулентном движении, нежели при ламинарном, струйка

должна пройти вдоль контура тела при турбулентном движении относительно большее расстояние до точки отрыва, нежели при ламинарном (рис. 7.47). Поэтому, как только ламинарный профиль скоростей сменяется турбулентным, точка отрыва слоя скачком сдвигается вниз по потоку. Это обстоятельство является причиной *кризиса сопротивления неудобообтекаемых тел* (см. гл. III).

Как известно, зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса протекает для неудобообтекаемых тел по-иному, нежели для удобообтекаемых. Напомним в качестве примера этой зависимости для неудобообтекаемых тел кривую изменения коэффициента сопротивления шара при изменении числа Рейнольдса.



Рис. 7.47. При переходе от ламинарного течения в пограничном слое к турбулентному касательное напряжение на поверхности тела увеличивается и точка отрыва слоя перемещается по потоку.

При средних по величине значениях числа Рейнольдса, до значения, при котором происходит кризис сопротивления, пограничный слой, движение в котором везде ламинарное, отрывается от поверхности шара по окружности, расположенной перед его миделевым сечением ($\theta = 82^\circ - 83^\circ$). Сопротивление шара при этих числах Рейнольдса происходит главным образом от пониженных давлений (подсасываний), вызываемых вихрями на задней стороне его поверхности.

Как только при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса возникает за некоторым сечением в пограничном слое турбулентное движение, точка отрыва слоя мгновенно смещается за мидель (до $\theta = 140^\circ$). Несмотря на то, что сопротивление трения при этом увеличивается (по двум причинам: увеличиваются касательные напряжения и уменьшается часть поверхности, на которой $\tau_0 < 0$), общее сопротивление шара резко убывает, так как сужается вихревая область и уменьшается сопротивление от подсасывания. В этом заключается явление кризиса сопротивления, которое было в общих чертах рассмотрено в гл. III.

При числах Рейнольдса, больших кризисного, шар является телом, значительно более удобообтекаемым, нежели до кризиса.

С увеличением числа Рейнольдса в закризисной области коэффициент сопротивления шара несколько увеличивается. Это происходит оттого, что точка перехода ламинарного движения в турбулентное перемещается с возрастанием числа Рейнольдса по направлению к носовой критической точке и вслед за нею перемещается в том же направлении точка отрыва пограничного слоя. Ширина вихревой области при этом увеличивается, и это влечет за собой некоторое увеличение c_x .

Приведенное выше объяснение кризиса сопротивления неудобообтекаемых тел можно подтвердить на опыте, который с очевидностью демонстрирует, что причиной кризиса является турбулентность пограничного слоя. Опыт заключается в том, что в пограничном слое шара

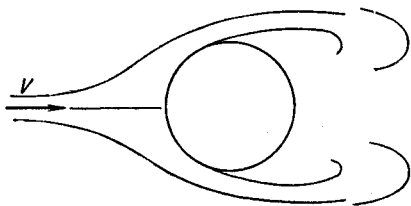


Рис. 7.48. Обтекание шара при числе Рейнольдса, меньших кризисного.

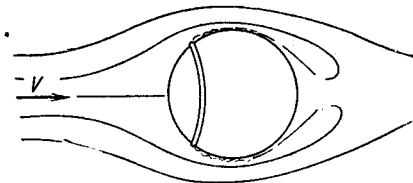


Рис. 7.49. Искусственное воспроизведение послекризисной формы обтекания шара с помощью тонкого проволочного кольца, надетого на шар, турбулизирующего пограничный слой.

при докритических значениях числа Рейнольдса искусственно создается турбулентное движение. С этой целью на испытываемый шар можно надеть, например, тонкое проволочное кольцо. В пограничном слое шара при обтекании кольца возникают мелкие вихри, турбулизирующие пограничный слой. Оказывается, что, несмотря на то, что числа Рейнольдса меньше кризисного, при обтекании шара с кольцом имеет место типичное явление кризиса, и сопротивление шара с кольцом, как показывают измерения, примерно в три раза меньше, чем без кольца. На рис. 7.48 представлен спектр обтекания шара без проволочного кольца, а на рис. 7.49 — спектр обтекания такого же шара с кольцом; в случае шара без кольца имеет место докритическая форма течения, с кольцом — послекритическая.

Можно турбулизовать пограничный слой, т. е., точнее говоря, сдвинуть против потока точку перехода ламинарного движения в слое в турбулентное, и другими способами. Так, например, если перед круговым цилиндром поместить решетку, состоящую из планок, то вследствие увеличения степени турбулентности набегающего на цилиндр потока переход ламинарного движения в слое в турбулентное произойдет раньше, а отрыв пограничного слоя — позже, нежели без решетки. Спектры обтекания кругового цилиндра с турбулизирующей решеткой и без нее представлены на рис. 7.50.

Аналогичного результата можно достигнуть, помещая турбулизирующие планки на передней стороне цилиндра вдоль его образующих, как показано на рис. 7.51.

Итак, мы приходим к несколько парадоксальному заключению о том, что *при переходе ламинарного движения в пограничном слое в турбулентное* неудобообтекаемые тела становятся более удобообтекаемыми, т. е., иными словами, их *сопротивление от давлений*

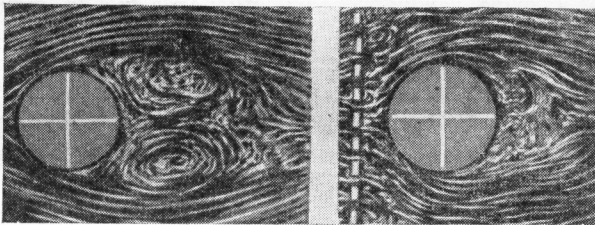


Рис. 7.50. Решетка, помещенная перед круговым цилиндром, увеличивает степень турбулентности набегающего на цилиндр потока. Вследствие этого турбулируется пограничный слой и наступает послекризисная форма течения.

резко снижается. Парадоксальность этого вывода заключается в том, что, как известно из предыдущего, влияние турбулентности в пограничном слое на сопротивление трению как раз обратное. При переходе ламинарного движения в турбулентное *сопротивление трению резко увеличивается*. Таким образом, одно и то же обстоятельство (турбулентность движения в пограничном слое) в силу одних и тех же причин влечет за собой противоположные следствия, в зависимости от того, имеет ли оно место на неудобообтекаемых телах или удобообтекаемых.

Поэтому, желая воздействовать на пограничный слой с целью уменьшения сопротивления тела, нужно поступать по-разному, в зависимости от того, идет ли речь об уменьшении сопротивления трению или об уменьшении сопротивления давлению. В первом случае необходимо стремиться к затягиванию перехода ламинарного движения в турбулентное на возможно большее расстояние от носовой точки. Во втором случае необходимо турбулизировать пограничный слой, с тем чтобы сдвинуть вдоль по потоку точку отрыва слоя.

Следует отметить, что турбулизация пограничного слоя на неудобообтекаемом теле не только снижает его лобовое сопротивление, но и *повышает теплоотдачу от тела к среде*. Это происходит, во-первых, от турбулентного перемешивания, возникающего в слое, во-вторых, от более полного охвата тела струйками набегающего потока,

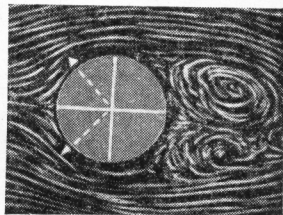


Рис. 7.51. Турбулизирующее влияние планок, находящихся на передней стороне цилиндра.