

Эти зависимости изображены на рис. 7.64; на этом же рисунке нанесены соответствующие зависимости для ламинарного течения в слое (см. § 23). Сопоставление показывает, что с возрастанием M_∞ толщина ламинарного пограничного слоя возрастает быстрее, нежели турбулентного, а c_x убывает медленнее, нежели у турбулентного.

§ 26. Влияние сжимаемости среды на положение точки отрыва пограничного слоя. Взаимодействие пограничного слоя и скачков уплотнения

Из предыдущих параграфов известно, что с возрастанием числа M_∞ толщина пограничного слоя на плоской пластинке возрастает (как при ламинарном, так и при турбулентном течении), а коэффициент касательного напряжения убывает. Можно доказать, что если $U(x)$ остается неизменным при возрастании M_∞ , то эти положения относятся

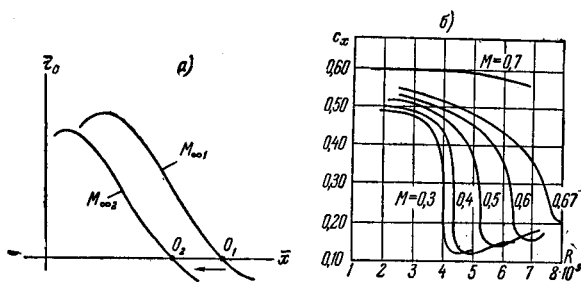


Рис. 7.65. Влияние сжимаемости среды на положение точки отрыва пограничного слоя и вихревое сопротивление тела.

не только к плоской пластинке, но и к телу с криволинейной поверхностью (см. § 24). Уменьшение коэффициента касательного напряжения с возрастанием M_∞ влечет за собой перемещение точки отрыва пограничного слоя; очевидно, что при увеличении M_∞ точка отрыва смещается против потока, т. е. к носку тела (рис. 7.65, а).

В результате этого вихревая область за телом расширяется при увеличении M_∞ и составляющая c_x , которая происходит от вихрей, возрастает. Уменьшение сопротивления трения приводит, таким образом, к увеличению вихревого сопротивления. Это обстоятельство иллюстрируется рис. 7.65, б, на котором изображены для шара зависимости c_x от R при разных M_∞ .

Из графиков видно, что при одном и том же R c_x шара с возрастанием M_∞ увеличивается. В связи с этим при возрастании M_∞ кризис сопротивления шара затягивается на большие значения числа Рейнольдса.

Влияние сжимаемости среды на течение в пограничном слое состоит не только в изменении поля скоростей, касательных напряжений и толщины слоя, что уже было изучено в предыдущих параграфах на примере плоской пластинки, но также во *взаимодействии скачков уплотнения и пограничного слоя*. Как известно из предыдущего, в сжимаемой среде при $M_\infty > M_{кр}$ возникают скачки уплотнения и они оказывают весьма значительное влияние на течение в пограничном слое; пограничный слой в свою очередь изменяет скачки уплотнения по сравнению с идеальной средой. Рассмотрим некоторые особенности скачков уплотнения в вязкой среде и явления, происходящие от взаимодействия пограничного слоя и скачков уплотнения.

Если на внешней границе пограничного слоя скорость потока больше скорости звука, то, так как на внутренней границе скорость

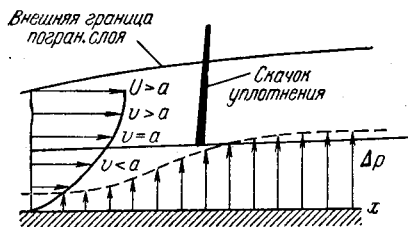


Рис. 7.66. Сверхзвуковая и дозвуковая части пограничного слоя. Скачок уплотнения вызывает на поверхности тела добавочные давления $\Delta p = f(x)$.

всегда равна нулю, пограничный слой можно разделить на две части: внешнюю — сверхзвуковую и внутреннюю — дозвуковую (рис. 7.66). Общая граница этих частей является вместе с тем границей скачка уплотнения: скачок, пересекая сверхзвуковую часть пограничного слоя, не продолжается в дозвуковую часть. Поэтому перепад давления между сечениями, взятыми перед скачком и за скачком, будет разным на внешней границе слоя и на его внутренней границе, т. е. на поверхности тела. Мы видим, таким образом, что одно из основных свойств пограничного слоя — неизменность давления по сечению — не имеет места в случае, когда в пограничном слое есть скачок уплотнения. Опыты по измерению давления на поверхности тела и вблизи нее показывают, что на поверхности тела у подножия скачка не наблюдается такого резкого нарастания давления по потоку, как в самом скачке. Это наиболее четко проявляется в том случае, когда пограничный слой ламинарный, так как при этом дозвуковая часть пограничного слоя относительно толще, чем при турбулентном течении с тем же значением M_∞ , и скачок уплотнения расположен дальше от поверхности тела. При переходе к турбулентному течению основание скачка приближается к поверхности тела и влияние скачка на распределение давления усиливается (рис. 7.67).

Вызванные скачком уплотнения добавочные давления распространяются через дозвуковую часть пограничного слоя не только по потоку, но и вперед, против потока, на большое расстояние от основания скачка, порядка 50 толщин пограничного слоя. Нарастание давления по потоку влечет за собой, как известно из предыдущего, утолщение пограничного слоя, а при достаточно большой величине градиента

давления — и его отрыв от поверхности тела. На рис. 7.68 представлены фотографии сверхзвукового потока, обтекающего вогнутый угол, в случаях ламинарного и турбулентного течений в пограничном слое. Из фотографий видно, что за скачком уплотнения и непосредственно перед ним пограничный слой значительно утолщается. Это утолщение особенно заметно в случае ламинарного течения в слое, так как вообще роль градиента давления в формировании пограничного слоя гораздо бóльшая при ламинарном течении, нежели при турбулентном.

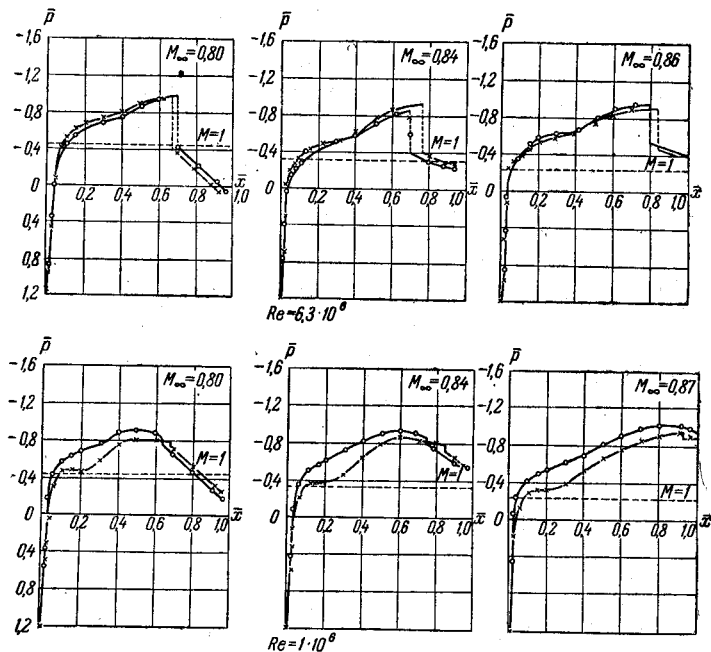


Рис. 7.67. Распределение давления по контуру профиля при одном и том же значении M_∞ , но разных значениях R .

Утолщение пограничного слоя перед скачком уплотнения вызывает увеличение толщины вытеснения и, следовательно, увеличение отклонений линий тока от поверхности тела в сверхзвуковой части пограничного слоя и во внешнем потоке. Картина линий тока получается такой, как если бы сверхзвуковой поток обтекал вогнутый угол. При ламинарном течении в пограничном слое, когда отсеснение линии тока от поверхности тела значительно больше, чем при турбулентном, в результате этого отсеснения возникает косой скачок уплотнения. Вместе с основным скачком, который вызвал утолщение слоя, этот косой скачок образует лямбдаобразный скачок уплотнения (рис. 7.69). При турбулизации пограничного слоя отсеснение линий тока уменьшается и косой скачок в вогнутом угле пропадает.

За скачком уплотнения в результате резкого повышения давления по потоку пограничный слой обычно оторван от поверхности тела

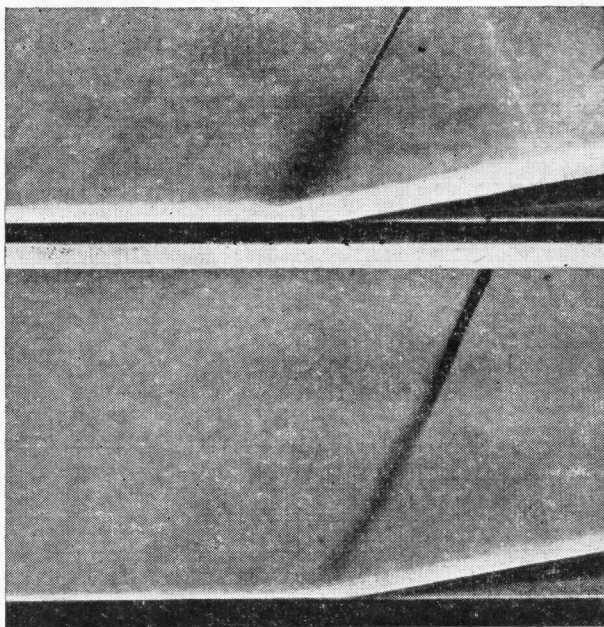


Рис. 7.68. Обтекание сверхзвуковым потоком вогнутого угла (угол отклонения потока $\vartheta = 10^\circ$, $M_\infty = 1,38$): а) пограничный слой перед скачком ламинарный, б) пограничный слой перед скачком турбулентный.

Возрастание лобового сопротивления при $M_\infty > M_{кр}$ обусловлено не

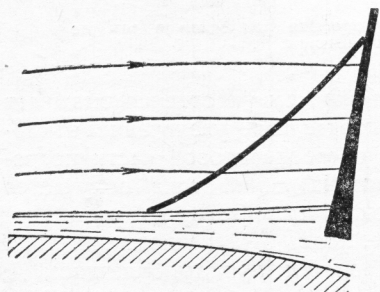


Рис. 7.69. Образование лямбдаобразного скачка уплотнения в результате утолщения ламинарного пограничного слоя и отщепления линий тока от поверхности тела.

только потерями механической энергии при ударном сжатии в скачках уплотнения, но также и отрывом пограничного слоя из-за появления скачков. Однако отрыв пограничного слоя, вызванный скачком, может привести и к уменьшению лобового сопротивления. Пример этого изображен на рис. 7.70. Здесь представлен спектр обтекания сверхзвуковым потоком неудобообтекаемого тела. Если перед телом укрепить тонкую пластинку или иглу, то на ней образуется область оторванного погра-

ничного слоя, которая имеет вид клина или конуса, а перед пла-

стинкой или иглой — косые скачки уплотнения. В случае идеальной среды мы имели бы перед телом отсоединенный прямой скачок уплотнения и волновое сопротивление было бы гораздо большим, чем в

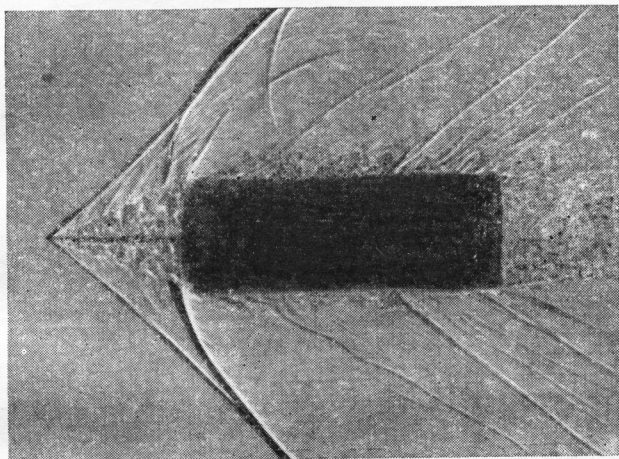


Рис. 7.70. Обтекание сверхзвуковым потоком ($M_{\infty} = 1,72$) неудобообтекаемого тела с острием.

вязкой среде. Образование жидких конусов или клиньев в результате отрыва пограничного слоя позволяет значительно снизить волновое сопротивление неудобообтекаемых тел.

§ 27. Понятие о тепловом пограничном слое. Уравнения теплопроводности для пограничного слоя

Ранее мы рассматривали пограничный слой, происходящий от вязкости среды (вязкий слой). Наряду с вязким слоем в среде у поверхности тела образуется при соответствующих условиях слой, в котором происходит резкое изменение температуры.

При приближении к поверхности неподвижного тела, обтекаемого вязкой сжимаемой средой, скорость уменьшается до нуля, а температура среды увеличивается (если поверхность тела не охлаждается). Максимальная температура среды в данном сечении достигается при этих условиях на поверхности тела (рис. 7.71, а); эта температура называется *температурой восстановления* и обозначается T_r (вследствие вязкости она несколько меньше температуры торможения в идеальной среде). Если поверхность тела нагревается, то температура газа у поверхности T_w (или у стенки, как мы будем в дальнейшем ее называть) будет больше T_r ; если поверхность тела охлаждается, то температура газа у поверхности будет меньше T_r (рис. 7.71, б, в).