

## § 12. Распространение возмущений в газе при движении в нем материальной точки. Конус возмущений

Перейдем теперь от изучения движения идеальной жидкости к изучению *обтекания тела* такой жидкостью. Рассмотрим сначала некоторые отличия в обтекании тела сжимаемой средой от обтекания его несжимаемой средой.

В предыдущем уже указывалось (гл. II, § 8), что основное отличие движения газа от движения несжимаемой жидкости заключается в том, что *малые изменения давления распространяются в несжимаемой жидкости с бесконечно большой скоростью, а в газе — с конечной скоростью, равной  $a = \sqrt{dp/dr}$* . Это основное отличие влечет за собой весьма существенные изменения в картине обтекания тела потоком газа по сравнению с картиной обтекания несжимаемой жидкостью.

Каждая точка поверхности тела, движущегося в жидкости, является источником повышения или понижения давления. Распределение давлений по поверхности и скорость движения тела полностью определяют поле скоростей и давлений в окружающей тело идеальной жидкости. Но в *несжимаемой жидкости* поле скоростей и давлений вокруг тела должно устанавливаться *мгновенно*, тогда как в *сжимаемой жидкости* поле скоростей и да-

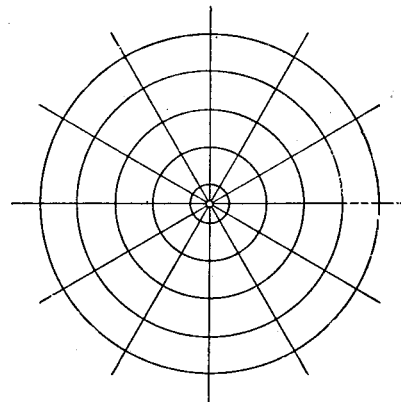


Рис. 5.10. Малое изменение давления, возникшее в покоящейся точке, распространяется равномерно во все стороны со скоростью, равной  $a$ .

вления устанавливается *постепенно*, по мере того, как упругие возмущения, вызванные повышением или понижением давления на поверхности тела, достигают все более удаленных от тела областей жидкости.

Для простоты будем представлять себе вначале, что в сжимаемой среде движется прямолинейно и равномерно тело малых размеров (материальная точка), являющееся источником малых, упругих возмущений. Если бы местное повышение или понижение давления в жидкости возникло в какой-либо неподвижной точке, то оно распространялось бы равномерно во все стороны по прямым, исходящим из этой точки (рис. 5.10). Через равные промежутки времени изменение давления достигало бы сферических поверхностей с центром в источнике возмущений и равномерно нарастающим радиусом (скорость его нарастания равна  $a$ ); эти сферические поверхности также изображены на рис. 5.10.

Как только источник возмущения начнет двигаться, произойдет нарушение симметрии в этой картине. Центры сферических поверх-

ностей, ограничивающих в разные моменты времени возмущенную область, будут смещаться с той же скоростью  $V$ , с которой движется источник возмущений. Если  $V < a$ , то картина будет такая, как изображено на рис. 5.11. При движении с дозвуковой скоростью возмущения, вызванные источником, опережают его.

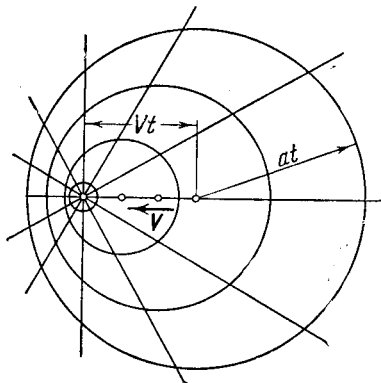


Рис. 5.11. Источник возмущения движется со скоростью  $V < a$ . За время  $t$  изменение давления распространяется до поверхности сферы радиуса  $at$ . Источник перемещается при этом на расстояние  $Vt$  и, следовательно, во все время движения остается внутри возмущенной области.

кой распространяются возмущения, то он будет все время находиться на границе возмущенной области (рис. 5.12). Возмущения, вызванные источником, не будут в этом случае распространяться в область, находящуюся перед ним.

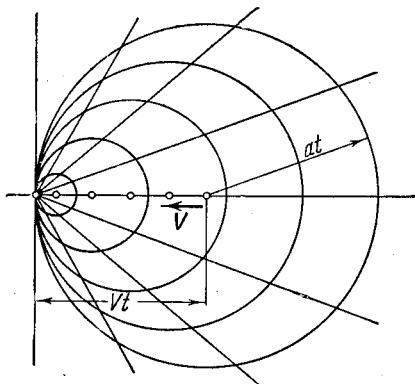


Рис. 5.12. При движении со скоростью распространения звука источник все время находится на границе возмущенной области.

Поместив в газ на линии движения источника какой-либо приемник давлений, увидим, что он отметит изменение давления до того, как источник возмущения будет в точке, где находится приемник. Это означает, иными словами, что если тело движется в газе с дозвуковой скоростью, то линии тока проникают вперед, в область перед телом. При обтекании тела набегающим на него потоком линии тока отклоняются *перед телом* от направления потока.

Если источник возмущения движется с такой же скоростью, с какой распространяются возмущения, то он будет все время находиться на границе возмущенной области (рис. 5.12). Возмущения, вызванные источником, не будут в этом случае распространяться в область, находящуюся перед ним. Возмущенная область отделена при этом от области, куда не проникают возмущения, плоскостью, перпендикулярной к направлению движения. Представим себе наблюдателя, к которому приближается со скоростью  $V = a$  звучащий источник; этот наблюдатель услышит звук только после того, как упомянутая плоскость пройдет через точку, где он находится.

Рассмотрим теперь случай, когда источник возмущения движется со сверхзвуковой скоростью и, следовательно, с такой же скоростью движется центр сферической

поверхности, ограничивающей в данный момент времени зону распространения возмущения для каждого положения источника (рис. 5.13).

Так как источник возмущения движется с постоянной скоростью, то пройденный им путь пропорционален времени и радиус сфериче-

ской поверхности также пропорционален времени; поэтому сферические поверхности, соответствующие положениям источника в разные моменты времени, имеют огибающую поверхность в виде конуса, вершина которого находится в центре источника, а ось совпадает с направлением движения. Этот конус называется *конусом возмущения*. В область вне этого конуса не проникают вызванные источником

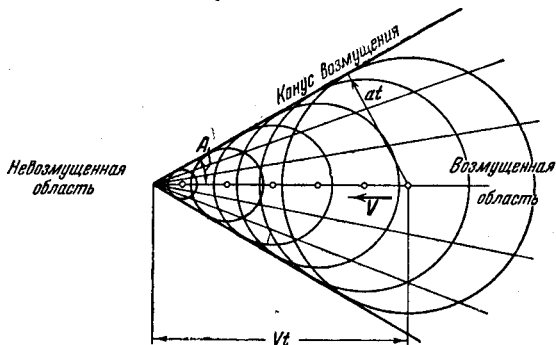


Рис. 5.13. Источник возмущения движется со скоростью  $V > a$ . Сферические поверхности имеют в этом случае огибающую поверхность — конус возмущения, который отделяет невозмущенную область от возмущенной.

возмущения; они распространяются только внутри конуса. Наблюдатель, находящийся вне конуса, не услышит издаваемого источником звука, даже если источник пройдет мимо него. Звук дойдет до наблюдателя лишь тогда, когда поверхность конуса достигнет наблюдателя.

Если представить себе, что источник возмущения находится в покое, а поток газа набегает на него со сверхзвуковой скоростью, то в область вне конуса *никогда* не проникнут колебания давления, вызванные источником; эта область является поэтому как бы областью запрещенных сигналов.

Размер возмущенной области, который можно охарактеризовать углом  $A$  между образующей конуса и его осью, зависит от числа  $M$ ; как видно из чертежа,

$$\sin A = \frac{a}{V} = \frac{1}{M}.$$

Таким образом, чем больше число  $M$ , тем тоньше возмущенная область.

Если в сверхзвуковом потоке находится тело конечных размеров, то каждая точка на его поверхности является источником возмущения и, следовательно, ее можно рассматривать как вершину соответствующего конуса возмущения. Огибающая поверхность для всех таких конусов будет отделять в этом случае возмущенную область от невозмущенной (рис. 5.14).

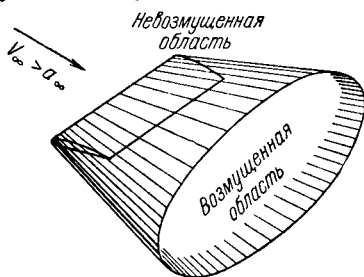


Рис. 5.14. Поверхность, отделяющая возмущенную область среды от невозмущенной в случае обтекания сверхзвуковым потоком тела конечных размеров.

При движении тела со сверхзвуковой скоростью линии тока вызванного им потока не проникают вперед, в невозмущенную область. Наличие возмущенных и невозмущенных телом областей в сверхзвуковом потоке коренным образом изменяет взаимное влияние частей летательного аппарата по сравнению с дозвуковым потоком.

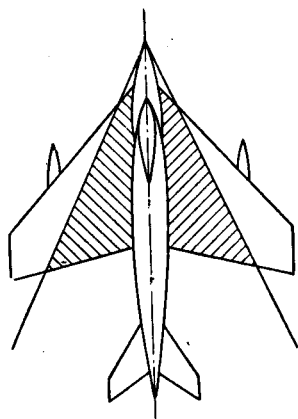


Рис. 5.15. Влияние фюзеляжа на крыло в скоростном самолете распространяется лишь на часть крыла, которая находится внутри конуса возмущения с вершиной в носовой точке фюзеляжа.

В дозвуковом потоке все части летательного аппарата взаимно влияют друг на друга, т. е. присутствие одной части (например, фюзеляжа) изменяет аэродинамические характеристики всех других (например, крыла, оперения и т. д.), и наоборот. В сверхзвуковом потоке одна часть влияет на другую только в том случае, если эта вторая часть находится *внутри конуса возмущения* первой части. Представим себе, например, фюзеляж скоростного самолета. При полете со сверхзвуковой скоростью возмущения, исходящие от поверхности фюзеляжа, распространяются лишь внутри конуса, вершина которого находится в носовой точке (рис. 5.15). Поэтому фюзеляж будет влиять только на те части крыла, мотогондол и т. д., которые расположены внутри этого конуса. Может оказаться при полете со сверхзвуковой скоростью, что две части самолета, например фюзеляж и мотогондола, вовсе не влияют друг на друга (рис. 5.16).

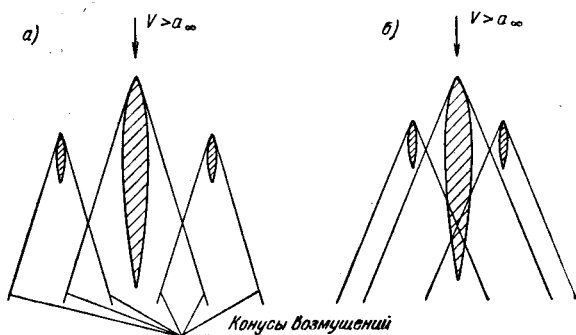


Рис. 5.16. Случай, когда в сверхзвуковом потоке: а) фюзеляж и мотогондолы не влияют друг на друга; б) мотогондолы влияют на фюзеляж, а обратного влияния не существует.

Вихри, сбегаящие с торцов крыла, вызывают, по известной из кинематики формуле Био — Савара, скорости в окружающей среде (рис. 5.17). В области горизонтального оперения эти скорости направлены вниз, и поэтому набегающий поток также отклоняется

книзу (возникает снос потока у горизонтального оперения). Однако если полет происходит со сверхзвуковой скоростью, то торцовые вихри будут индуцировать скорости лишь внутри конуса возмущения и может оказаться (если число  $M$

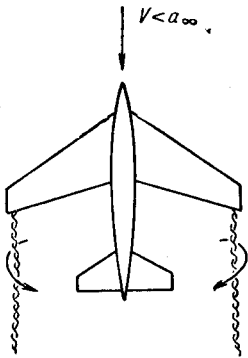


Рис. 5.17. При полете с дозвуковой скоростью торцовые вихри индуцируют у горизонтального оперения скорости, направленные вниз.

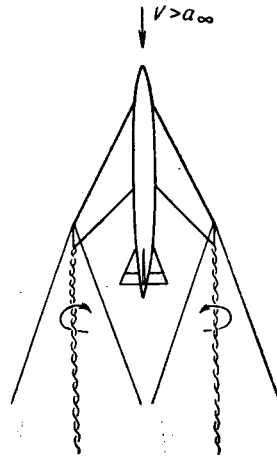


Рис. 5.18. При полете со сверхзвуковой скоростью горизонтальное оперение может оказаться вне конусов возмущения торцовых вихрей крыла.

достаточно велико), что оперение находится вне конусов возмущения торцовых вихрей (рис. 5.18), и тогда снос потока у горизонтального оперения не будет. Снос потока уменьшает угол атаки горизонтального оперения (рис. 5.19). Поэтому в полете при переходе на большие значения  $M$ , когда исчезает снос потока

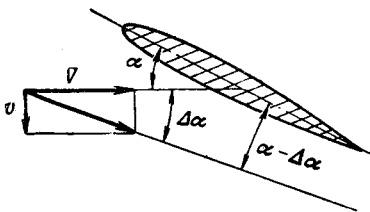


Рис. 5.19. Фактический угол атаки горизонтального оперения меньше установочного угла  $\alpha$  на величину угла сноса потока  $\Delta\alpha$ ;  $v$  — скорость, индуцированная вихрями, сбегающими с крыла.

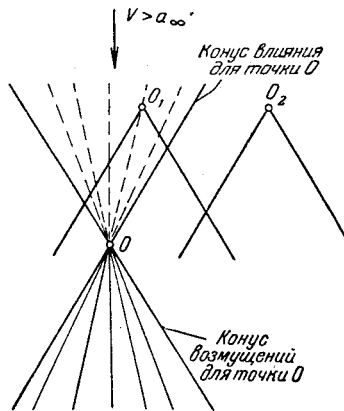


Рис. 5.20. Конус возмущения и конус влияния для точки  $O$ . Возмущения, исходящие из точки  $O_1$ , влияют на  $O$ ; возмущения, исходящие из точки  $O_2$  — не влияют.

у горизонтального оперения, угол атаки может резко увеличиться, и в результате увеличится нагрузка на хвостовую часть самолета.

Итак, в сверхзвуковом потоке возмущения, исходящие из какой-либо точки, ограничены в своем распространении внутренностью конуса с вершиной в этой точке. Но и возмущения, приходящие в данную точку из других точек, также ограничены по месту своего возникновения внутренностью конуса с вершиной в данной точке, который своим углом обращен в сторону, противоположную первому (рис. 5.20). Этот конус можно назвать *конусом влияния*.

### § 13. Критическое значение числа $M$ при обтекании тела потоком газа

Представим себе, что в сжимаемой среде движется тело конечных размеров, а не материальная точка, как это предполагалось в предыдущем параграфе. В этом случае в разных местах поверхности тела будут разные скорости, и это обстоятельство значительно осложняет,

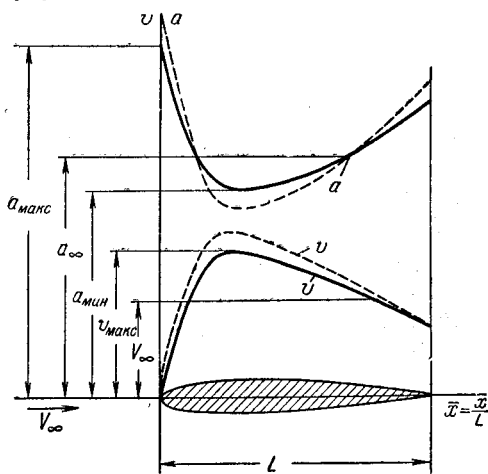


Рис. 5.21. Распределение скорости движения газа  $v$  и скорости распространения звука  $a$  вдоль контура продольного сечения тела. Случай, когда везде  $v < a$ .

по сравнению с движением материальной точки, всю картину явления. В носовой точке тела скорость равна нулю. При удалении от носовой точки вдоль контура продольного сечения тела скорость сначала нарастает, становится больше скорости набегающего потока  $V_\infty$ , достигает максимального для данного случая значения  $v_{\max}$  и затем убывает вплоть до хвостовой точки тела (рис. 5.21, нижний график).

Из предыдущего известно (гл. II, § 10), что скорость движения газа в данной точке связана при адиабатическом процессе со скоростью распространения звука в той же точке соотношением

$$\frac{v^2}{2} + \frac{a^2}{k-1} = \text{const.}$$