

## § 111. Пересечение ударных волн с твердой поверхностью

Фундаментальную роль в явлении стационарного пересечения ударных волн с поверхностью обтекаемого тела играет их взаимодействие с пограничным слоем. Свойства этого взаимодействия весьма сложны и их детальное рассмотрение выходит за рамки этой книги. Мы ограничимся здесь лишь некоторыми общими утверждениями<sup>1)</sup>.

В ударной волне давление испытывает скачок, возрастая по направлению движения газа. Поэтому, если бы ударная волна пересекла поверхность тела, то вблизи места пересечения имелось бы конечное возрастание давления на отрезке очень малой длины, т. е. имелся бы очень большой положительный градиент давления. Но мы знаем, что такое резкое возрастание давления вблизи твердой стенки невозможно (см. конец § 40); оно должно вызвать явление отрыва, в результате чего картина обтекания изменится таким образом, что ударная волна отодвинется на достаточное расстояние от поверхности тела. Исключение составляют лишь ударные волны достаточно слабой интенсивности. Из изложенного в конце § 40 доказательства ясно, что невозможность положительного скачка давления на границе пограничного слоя связана с предположением о достаточно большой величине этого скачка: он должен превосходить некоторый предел, зависящий от значения  $R$  и убывающий с его увеличением.

Таким образом, стационарное пересечение ударных волн с поверхностью твердого тела возможно лишь для ударных волн не слишком большой интенсивности, — тем меньшей, чем выше  $R$ . Предельная допустимая интенсивность ударной волны зависит также и от того, является ли пограничный слой ламинарным или турбулентным. Турбулизация пограничного слоя затрудняет возникновение отрыва (§ 45). Поэтому при турбулентном пограничном слое от поверхности тела могут отходить более сильные ударные волны, чем при ламинарном пограничном слое.

Подчеркнем, что для изложенных рассуждений существенно, чтобы пограничный слой имелся перед ударной волной (т. е. вверх по течению от нее). Поэтому сказанное выше не относится к волнам, отходящим от переднего края тела, как это может, например, иметь место при обтекании острого клина (о чем будет подробно идти речь в следующем параграфе). В последнем случае газ подходит к краю угла извне, т. е. из пространства, в котором никакого пограничного слоя не существует; ясно поэтому, что изложенные соображения ни в какой мере не за-

<sup>1)</sup> В пограничном слое непременно имеется прилегающая к поверхности тела дозвуковая часть, в которую ударная волна вообще не может проникнуть. Говоря условно о пересечении, мы отвлекаемся от этого обстоятельства, несущественного для нижеследующих рассуждений.

трагивают возможности существования ударных волн, отходящих от края такого угла.

При дозвуковом движении отрыв может произойти лишь при возрастании давления в основном потоке вниз по течению вдоль обтекаемой поверхности. При сверхзвуковом же движении появляется своеобразная возможность возникновения отрыва и в области, где давление падает вниз по течению. Такое явление может осуществляться путем комбинирования ударной волны слабой интенсивности с отрывом, причем необходимое для возникновения отрыва повышение давления происходит в самой ударной волне; в области же перед ударной волной давление может при этом как возрастать, так и падать вниз по течению.

Все сказанное выше относится только к стационарному пересечению, при котором ударная волна и твердое тело покоятся друг относительно друга. Перейдем к рассмотрению нестационарного пересечения, при котором на твердое тело падает проходящая извне движущаяся ударная волна, так что линия ее пересечения с поверхностью тела передвигается вдоль последней. Такое пересечение сопровождается отражением ударной волны: наряду с падающей волной возникает еще одна, отраженная волна, отходящая от тела.

Будем рассматривать явление в системе координат, движущейся вместе с линией пересечения; в этой системе ударные волны стационарны. Наиболее простая картина отражения заключается в том, что отраженная волна отходит непосредственно от линии пересечения; такое отражение называется правильным (рис. 105). Заданием угла падения  $\alpha_1$  и интенсивности падающей волны однозначно определяется движение в области 2.

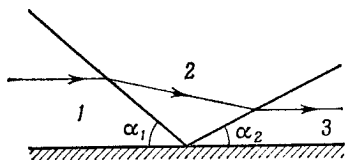


Рис. 105

В отраженной волне скорость газа должна повернуться на определенный угол так, чтобы снова стать параллельной поверхности тела. По этому углу положение и интенсивность отраженной волны определяются уравнением ударной поляры. Но при заданном угле поворота скорости ударная поляра определяет две различные ударные волны: волны слабого и сильного семейства (§ 92). Опытные данные показывают, что фактически отраженная волна всегда относится к слабому семейству, и ниже будет подразумеваться именно этот выбор. Следует указать, что при таком выборе при предельном переходе к бесконечно слабой интенсивности падающей волны интенсивность отраженной волны тоже стремится к нулю, а угол отражения  $\alpha_2$  — к углу падения  $\alpha_1$ , как и должно было быть в соответствии с акустическим приближением. В пределе же  $\alpha_1 \rightarrow 0$  отраженная волна слабого семейства непрерывно переходит в волну, получаю-

щуюся для отражения при лобовом падении ударной волны (задача 1 § 100).

Математический расчет правильного отражения (в идеальном газе) не представляет никаких принципиальных затруднений, но алгебраически весьма громоздок. Мы ограничимся здесь лишь изложением некоторых результатов<sup>1)</sup>.

Из общих свойств ударной волны ясно, что правильное отражение возможно отнюдь не при произвольных значениях параметров падающей волны (угла падения  $\alpha_1$  и отношения  $p_2/p_1$ ). При заданном значении  $p_2/p_1$  существует предельный допустимый угол  $\alpha_{1k}$ ; при  $\alpha_1 > \alpha_{1k}$  правильное отражение невозможно. При  $p_2/p_1 \rightarrow 1$  предельный угол стремится к  $90^\circ$ , т. е. правильное отражение воз-

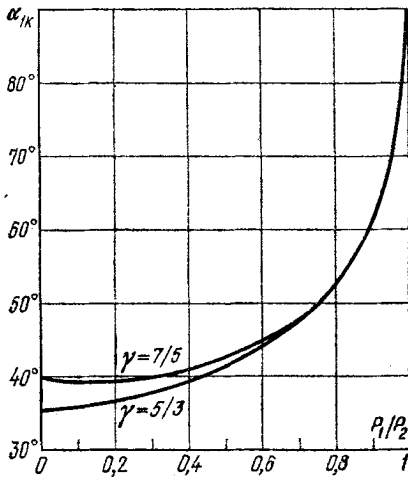


Рис. 106

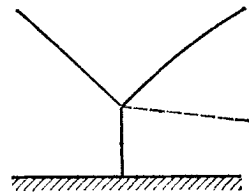


Рис. 107

можно при всяком угле падения. В пределе же  $p_2/p_1 \rightarrow \infty$  он стремится к некоторому значению, зависящему от  $\gamma$ ; для воздуха это  $40^\circ$ . На рис. 106 дан график  $\alpha_{1k}$  как функции  $p_1/p_2$  для  $\gamma = 7/5$  и  $\gamma = 5/3$ .

Угол отражения  $\alpha_2$ , вообще говоря, не совпадает с углом падения. Существует определенное значение  $\alpha_*$  угла падения, такое, что при  $\alpha_1 < \alpha_*$  угол отражения  $\alpha_2 < \alpha_1$ ; если же  $\alpha_1 > \alpha_*$ , то  $\alpha_2 > \alpha_1$ . Значение  $\alpha_*$  есть

$$\alpha_* = \frac{1}{2} \operatorname{arccos} \frac{\gamma - 1}{2}$$

(для воздуха  $\alpha_* = 39,2^\circ$ ); замечательно, что оно не зависит от интенсивности падающей волны.

<sup>1)</sup> Более подробное изложение вопроса об отражении ударных волн можно найти в книгах: Курант Р., Фридрихс К. Сверхзвуковое течение и ударные волны. — М.: ИЛ, 1950, гл. IV [Courant R., Friedrichs K. Supersonic flow and shock waves. — N. Y.: Interscience, 1948]; Мизес Р. Математическая теория течения сжимаемой жидкости. М.: ИЛ, 1961, § 23 [Mises R. Mathematical theory of compressible fluid flow. — N. Y., Academic Press, 1958], а также в обзорной статье: Bleakney W., Taub A. H. — Rev. Mod. Physics, 1949, v. 21, p. 584.

При  $\alpha_1 > \alpha_{1k}$  правильное отражение невозможно и падающая ударная волна должна разветвиться на некотором расстоянии от поверхности тела, так что возникает картина изображенного на рис. 107 типа с тройной конфигурацией ударных волн и отходящим от точки разветвления тангенциальным разрывом (такую конфигурацию называют *маховским отражением*).

## § 112. Сверхзвуковое обтекание угла

При исследовании движения вблизи края угла на поверхности обтекаемого тела снова достаточно рассматривать лишь небольшие участки вдоль края угла и потому можно считать этот край прямым, а самый угол образованным двумя пересекающимися плоскостями.

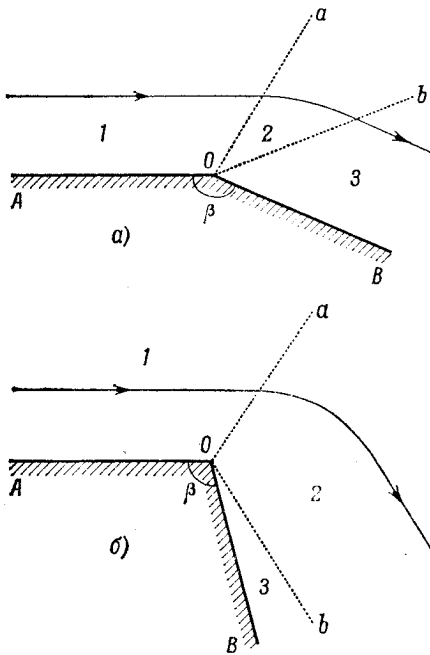


Рис. 108

Мы будем говорить об обтекании выпуклого угла, если течение происходит в угле, большем чем  $\pi$ , и об обтекании вогнутого угла, если газ движется внутри угла, меньшего чем  $\pi$ .

Дозвуковое обтекание угла по своему характеру ничем не отличается от обтекания несжимаемой жидкостью. Сверхзвуковое же обтекание обладает совершенно иным характером; существенной его особенностью является возникновение отходящих от края угла разрывов.

Рассмотрим сначала возможные режимы обтекания, когда сверхзвуковой поток газа подходит к краю угла, двигаясь вдоль одной из его сторон. В соответствии с общими свойствами сверхзву-

кового течения поток остается однородным вплоть до самого края угла. Поворот течения, переводящий его в направлении, параллельное другой стороне угла, осуществляется в отходящей от края угла волне разрежения, и вся картина движения складывается из трех областей, отделенных друг от друга слабыми разрывами ( $Oa$  и  $Ob$  на рис. 108): однородный поток газа 1, движущийся вдоль стороны угла  $AO$ , поворачивает в волне разрежения 2, после чего снова движется с постоянной скоростью