

## О НЕОБХОДИМОМ УСЛОВИИ ОТРЫВА ТРЕХМЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Г. М. БАМ-ЗЕЛИКОВИЧ

(Москва)

Показаны недостатки предлагавшихся ранее определений линии отрыва трехмерного пограничного слоя. На основании анализа явлений, возникающих при отрыве пограничного слоя, найдено, что необходимым условием отрыва трехмерного пограничного слоя является наличие на обтекаемой поверхности линии, на которой пристеночные линии тока перпендикулярны градиенту давления. Рассмотрены возможные конфигурации зоны обратных токов трехмерного пограничного слоя.

Многими авторами давалось различное определение линии отрыва при трехмерном течении в пограничном слое. Так, в [1] линия отрыва определялась как огибающая предельных линий тока (т. е. линий, являющихся пределом линий тока при приближении по нормали к обтекаемой поверхности). В [2] и [3] под линией отрыва предлагалось понимать предельную линию тока, проходящую через точку, где напряжение трения на стенке  $\tau_w = 0$ . В [4] линией отрыва называется линия, разделяющая потоки, приходящие из разных областей.

Первые два из приведенных выше определений линии отрыва, хотя, быть может, и выполняются в отдельных случаях, не справедливы для произвольного трехмерного течения с отрывом. Так, например, при обтекании со скольжением цилиндра конечной длины имеется отрыв пограничного слоя, но нет ни огибающей предельных линий тока, ни точки, в которой было бы  $\tau_w = 0$ . Третье определение линии отрыва также весьма условно. Линия отрыва разделяет области с различным характером течения. Однако частицы газа, близкие к линии отрыва, но находящиеся в разных сторонах от нее, могут оставаться близкими в течение большого отрезка или даже всего пути.

Вопрос о том, что называть линией отрыва, интересен как сам по себе, так и потому, что с ним связан вопрос о возможности предсказания отрыва без того, чтобы производить весь расчет течения. Так, в работе [3], исходя из приведенного выше определения линии отрыва, делается вывод, что «в случае трехмерного течения по локальным характеристикам пограничного слоя невозможно установить наличие отрыва». С другой стороны, на основе полученных экспериментальных данных в [5] отмечается, что «гипотеза о локальном характере условий отрыва, по-видимому, будет справедлива и в трехмерном пространстве».

1. Понятие линии отрыва при трехмерном течении должно включать в себя как частный случай соответствующее понятие линии или точки отрыва при двумерном течении в пограничном слое. Поэтому рассмотрим подробнее характерные свойства точки отрыва и разделяемых ею зон в двумерном случае. Во-первых, в точке отрыва напряжение трения на стенке обращается в нуль. Во-вторых, точка отрыва является точкой раздела двух зон: в зоне перед ней как скорость внешнего потока  $U$ , так и скорость вблизи стенки (и напряжение трения на стенке  $\tau_w$ ) направлены в ту же сторону, что и  $\text{grad } p$  (т. е. против сил давления); в зоне же за точкой отрыва  $\tau_w$  направлено противоположно  $U$  и  $\text{grad } p$  (т. е. скорость у стенки направлена по направлению действия сил давления). Так как частицы в зоне за точкой отрыва либо совершают циркуляционное движение, если зона отрыва замкнутая, либо приходят из областей потока, находящихся далеко позади точки отрыва, то третьим характерным свойством точки отрыва является то, что линии тока, подходящие к ней с разных сторон, приходят из различных областей потока, т. е. бесконечно близкие частицы газа, находящиеся по разные стороны точки отрыва, в своем предыдущем движении были на конечном расстоянии друг от друга.

В двумерном пограничном слое определяют точку отрыва как точку, в которой обращается в нуль напряжение трения на стенке. При таком определении еще не следует то, что за этой точкой обязательно имеется отрывная зона, так же как и то, что фактический отрыв пограничного слоя и нарушение внешнего потока произойдет обязательно над этой точкой, а не раньше. Действительно, теоретически внешнее течение может быть таково, что за точкой, где  $\tau_w = 0$ , снова будет  $\tau_w > 0$ , или же будет  $\tau_w \equiv 0$  во всем течении (такие автомодельные решения хорошо изучены). На практике же бывает, что зона отрыва столь мала, что ее наличие может быть обнаружено лишь точнейшими методами измерений, и никак не сказывается на всем течении (например, так бывает в угловой точке дозвукового диффузора с углом раствора меньше  $6^\circ$ ). С другой стороны, при развитом отрыве обратное влияние на внешний поток может быть столь велико, что начало отрыва перемещается вверх по потоку от того места, где первоначально возник отрыв. Наблюдаются также случаи сильной неустойчивости отрывного течения, когда начало отрыва периодически перемещается вверх и вниз по потоку.

Из всего сказанного следует, что когда при расчете двумерного пограничного слоя говорят о точке, где  $\tau_w = 0$ , как о точке отрыва, то фактически подразумевают, что выполнение условия  $\tau_w = 0$  в некоторой точке есть необходимое условие отрыва. Это означает, что если  $\tau_w$  всюду больше нуля, то отрыва не будет. Если же где-либо  $\tau_w = 0$ , то может возникнуть отрыв, причем течение в этом случае и, в частности, положение точки начала отрыва должно рассчитываться с учетом течения в отрывной зоне и его влияния на поток вне пограничного слоя (иногда, конечно, начало зоны отрыва может и совпадать с найденной первоначально точкой отрыва).

Если так обстоит дело в случае двумерного пограничного слоя, то в общем случае трехмерного течения в пограничном слое тем более имеет смысл ставить вопрос лишь об отыскании необходимых условий отрыва, т. е. таких условий, лишь при выполнении которых в потоке могут возникнуть отрывные зоны, оказывающие влияние на все течение вне пограничного слоя. Соотношения, выполняющиеся в точках искомой линии, должны вытекать из обобщения характерных свойств точек отрыва двумерного пограничного слоя. Выше указывалось три таких свойства. Первое из них — обращение в нуль  $\tau_w$  — не может быть необходимым условием отрыва трехмерного слоя, так как существуют отрывные течения, в которых  $\tau_w$  нигде не равно нулю. Ряд авторов [4] принимает за линию отрыва пристеночную линию тока, обладающую третьим свойством. В дополнение к тому, что говорилось о недостатках этого определения, заметим, что оно не является эффективным. Для того чтобы судить из каких областей приходят предельные линии тока, необходимо рассчитать (или определить экспериментально) всю картину течения, в том числе и течение в отрывной зоне, и влияние отрыва на внешний поток, так как частицы в зону отрыва могут подсасываться из внешнего потока, как, например, в опытах работы [6]. Таким образом, исходя из такого определения, нельзя заранее указать, возможен ли отрыв данного пограничного слоя или нет.

Необходимое условие отрыва может быть выведено путем обобщения на трехмерный пограничный слой второго свойства точки отрыва. Это свойство выражает очевидное физическое существо причины возможного отрыва пограничного слоя, а именно тот факт, что отрыв может наступать лишь тогда, когда пристеночные частицы не могут двигаться против сил давления, в то время как во внешнем потоке такое движение возможно. Чтобы провести такое обобщение, введем следующее определение: будем

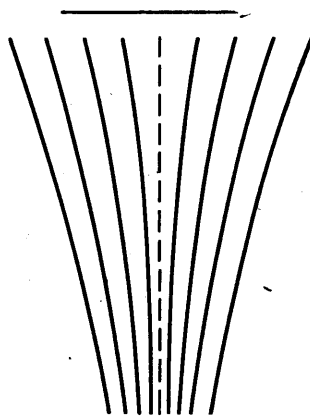
говорить, что в данной точке имеется течение с ускорением, если скалярное произведение вектора скорости  $\mathbf{u}$  на  $\text{grad } p$  отрицательно, и что имеется течение с торможением, если  $\mathbf{u} \cdot \text{grad } p > 0$ . Такое определение оправдывается тем, что в потоке идеального газа или жидкости при  $\mathbf{u} \cdot \text{grad } p < 0$  при движении вдоль линии тока будет

$$d\mathbf{u}^2 / dt = 2\mathbf{u} \cdot d\mathbf{u} / dt = -2\mathbf{u} \cdot \text{grad } p / \rho > 0$$

т. е. модуль скорости возрастает, а при  $\mathbf{u} \cdot \text{grad } p > 0$  модуль скорости убывает.

Говорить об отрыве имеет смысл тогда, когда вне пограничного слоя имеется течение с торможением. При таком движении будет не равная нулю составляющая скорости, направленная по  $\text{grad } p$  (т. е. против сил давления). Если пристеночные частицы не могут двигаться против сил давления, то у стенки проекция скорости на направление  $\text{grad } p$  меньше или равна нулю. Таким образом, необходимым условием отрыва является требование, чтобы имелась зона, в которой вне пограничного слоя было бы течение с торможением, а у стенки — течение с ускорением. Границей этой зоны будет линия, в точках которой пристеночные линии тока перпендикулярны  $\text{grad } p$ . Эта линия может быть названа границей зоны обратных токов (в том смысле, что проекции скоростей у стенки и во внешнем потоке на  $\text{grad } p$  имеют противоположное направление). Так как направление пристеночных линий тока совпадает с направлением  $\tau_w$ , то необходимое условие отрыва трехмерного пограничного слоя может быть записано в виде

$$\tau_w \cdot \text{grad } p = 0, \quad \mathbf{U} \cdot \text{grad } p > 0 \quad (2.1)$$



Фиг. 1

Вообще говоря, граница зоны обратных токов может не быть пристеночной линией тока и может не совпадать с границей пристеночных потоков, приходящих из различных областей течения. Но можно утверждать, что эта последняя, если она существует и не совпадает с границей зоны обратных токов, находится вниз по потоку от нее. В отдельных случаях эти две линии могут совпадать, и тогда граница обратных токов трехмерного пограничного слоя будет пристеночной линией тока и линией отрыва в том же смысле, что и при двумерном течении в пограничном слое. Следует еще раз подчеркнуть, что наличие в потоке линии, удовлетворяющей соотношению (2.1), является лишь необходимым условием возникновения отрыва трехмерного пограничного слоя.

2. Рассмотрим подробнее возможное расположение передней границы зоны обратных токов. Обозначим через  $\tau_0$  единичный вектор касательной к этой линии. Будем считать, что вектор  $\tau_0$  направлен так, что  $\tau_0 \cdot \tau_w > 0$ . Если  $\tau_0 \cdot \text{grad } p = 0$ , то изучаемая линия совпадает с пристеночной линией тока и, как уже отмечалось, является линией отрыва в обычном понимании этого слова.

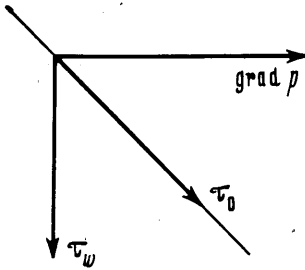
На фиг. 1 показано возможное положение границы обратных токов и пристеночных линий тока в этом случае. Пунктирной линией нанесена граница обратных токов (линия отрыва), сплошными кривыми — пристеночные линии тока, стрелкой показано направление  $\text{grad } p$ . Так как для внешнего потока  $\mathbf{U} \cdot \text{grad } p > 0$ , то зона отрыва расположена на фиг. 1 справа.

Случай  $\tau_0 \cdot \text{grad } p > 0$ , при котором векторы расположены так, как указано на фиг. 2, для передней границы зоны обратных токов не может осуществиться, так как пристеночные линии тока в этом случае должны были бы выходить из зоны обратных токов (находящейся, как и на фиг. 1, справа), а не входить в нее.

Наконец, если  $\tau_0 \cdot \text{grad } p < 0$ , то расположение передней границы зоны обратных токов и пристеночных линий тока будет таким, как показано на фиг. 3 (обозначения те же, что и на фиг. 1). При этом передняя граница зоны обратных токов не совпадает с границей раздела потоков, приходящих из различных областей. В этом случае отрыва пограничного слоя в обычном понимании может не возникать.

Можно привести практически интересные примеры, когда  $\tau_0 \cdot \text{grad } p = 0$  и передняя граница зоны обратных токов является линией отрыва.

а) Пусть имеем обтекание со скольжением крыла или цилиндра бесконечного размаха. Так как течение не зависит от координаты вдоль образующей крыла, то граница обратных токов должна совпадать с одной из образующих, т. е. быть перпендикулярна градиенту давления.



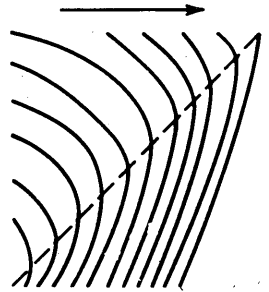
Фиг. 2

б) При обтекании вдоль оси вращающегося осесимметричного тела градиент давления вследствие осевой симметрии направлен вдоль образующей тела, а граница обратных токов перпендикулярно образующей. И в этом случае граница обратных токов является пристеночной линией тока и границей раздела потоков, приходящих из различных областей течения, т. е. линией отрыва.

в) Предположим, что трехмерный отрыв пограничного слоя вызывается ударной волной (вообще говоря, криволинейной), имеющей достаточно большую интенсивность. Так как максимальное значение  $\text{grad } p$  достигается при переходе через след ударной волны на теле, то направление границы зоны обратных токов совпадает с направлением следа ударной волны. Градиент же давления перпендикулярен направлению следа ударной волны. Следовательно, при отрыве, вызываемом ударной волной, передняя граница зоны обратных токов всегда является пристеночной линией тока и разделяет потоки в пограничном слое, которые приходят из различных областей течения. Экспериментально такие случаи изучались в работах [7, 5].

3. Структура зоны обратных токов трехмерного слоя может быть аналогичной структуре двумерной зоны, т. е. возможна зона отрыва, уходящая далеко вниз по потоку и ограниченная спереди линией отрыва. Такое течение может быть в примерах а) и б). Возможна замкнутая зона отрыва, ограниченная целиком линией отрыва. Однако в трехмерном пограничном слое даже на плоскости возможна структура зоны обратных токов, которая не может быть в двумерном пограничном слое.

Пример такой структуры представляет собой зона, возникающая при обтекании дозвуковым потоком цилиндра, установленного на пластине [6]. В этом случае из-за быстрого изменения направления вектора градиента давления поток, обтекающий цилиндр вне пограничного слоя, переходит из замедленного в ускоренный. Этот переход происходит на границе пограничного слоя на линиях, на которых скорость внешнего потока перпендикулярна градиенту давления. Таким образом, та область на пластине, которую можно назвать зоной обратных токов, будет ограничена спереди



Фиг. 3

линией, на которой напряжение трения на стенке перпендикулярно градиенту давления (пристеночные линии тока перпендикулярны  $\text{grad } p$ ), сзади — стенкой цилиндра, а с боков — линиями, на которых на границе пограничного слоя линии тока внешнего потока перпендикулярны градиенту давления (т. е.  $U \cdot \text{grad } p = 0$ ). Внутри этой зоны находится линия, разделяющая частицы газа в пограничном слое, приходящие по пограничному слою спереди и подсасываемые в пограничный слой сзади из внешнего потока [6].

Возможны также случаи, когда течение таково, что градиент давления, возрастая до величины, при которой у стенки возникают обратные токи, затем быстро убывает, так что пристеночные частицы снова начинают двигаться против сил давления. Зона обратных токов будет ограничена тогда и спереди и сзади линиями, на которых  $\tau_w \cdot \text{grad } p = 0$ . Течение у стенки будет иметь вид, показанный на фиг. 4 (обозначения те же, что и на фиг. 1).



Фиг. 4

Поступило 22 IX 1969

## ЛИТЕРАТУРА

1. Eichelbrenner E. A., Oudart A. Le décollement laminaire en trois dimensions. Rech. Aéronaut., 1955, No. 47.
2. Eichelbrenner E. A. Décollement et recollement turbulent en trois dimensions. Rech. Aéronaut., 1961 No. 84.
3. Авдеевский В. С., Медведев К. И. Отрыв трехмерного пограничного слоя. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 2.
4. Хорлок Дж., Норбери Дж., Кук Дж. Пространственные пограничные слои: сообщение о втором европейском коллоквиуме по механике. Механика. Сб. перев. и обз. ин. период. лит., 1968, № 2 (108).
5. Панов Ю. А. Взаимодействие падающего трехмерного скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 3.
6. Hornung H. G., Joubert P. N. The mean velocity profile in three-dimensional turbulent boundary layers. J. Fluid Mech., 1963, vol. 15, pt 3.
7. Войтенко Д. М., Зубков А. И., Панов Ю. А. Обтекание цилиндрического препятствия на пластине сверхзвуковым потоком газа. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 1.