

*Плазменные аэродинамические трубы.* Для создания и исследования высокоскоростных и высокотемпературных потоков газа в последнее время интенсивно используются плазменные струи, получаемые с помощью специальных электродуговых устройств (рис. 3.25).

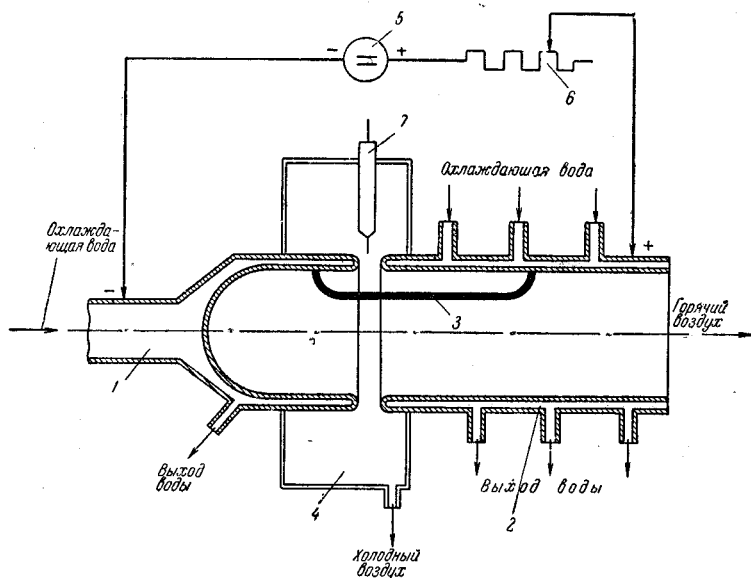


Рис. 3.25. Схема плазменной аэродинамической трубы.

1 — катод, охлаждаемый водой; 2 — анод, также охлаждаемый водой; 3 — электрическая дуга, подогревающая воздух, подаваемый из вихревой камеры 4, до высокой температуры. Плазмотрон питается от генератора постоянного тока 5 через реостат 6, необходимый для стабилизации режима горения дуги. Зажигание дуги осуществляется от специального разрядника 7.

При включении дуги поток плазмы высокой плотности выталкивается электромагнитными силами из кольцеобразного отверстия катода в виде струи с температурой  $10\,000 - 15\,000^\circ\text{C}$  и более.

Эта струя, будучи помещена в сверхзвуковое сопло с интенсивно охлаждаемыми стенками, связанное с вакуумной камерой, позволяет получить большие сверхзвуковые скорости при высоких температурах газа.

## § 8. Экспериментальное определение давлений и касательных напряжений на поверхности тела

Мы рассмотрим в этом параграфе наиболее часто применяющиеся способы экспериментального определения нормальных и касательных напряжений на поверхности тела, движущегося в воздушной среде или обтекаемого потоком среды.

Для измерения нормальных напряжений (давлений) делают на поверхности тела небольшие отверстия (диаметром приблизительно

0,5 мм), оси которых нормальны к поверхности. К этим отверстиям присоединяют трубочки (металлические или резиновые), которые другим своим концом подведены к микроманометрам. Каждое такое отверстие с присоединенной к нему трубкой является приемником статического давления на поверхности тела. Модель, внутри которой проложены трубочки, передающие статическое давление, называется *дренированной моделью*. Для того чтобы одновременно измерить давления во многих точках на поверхности тела, пьезометрические трубки жидкостных микроманометров монтируют на общем щите;

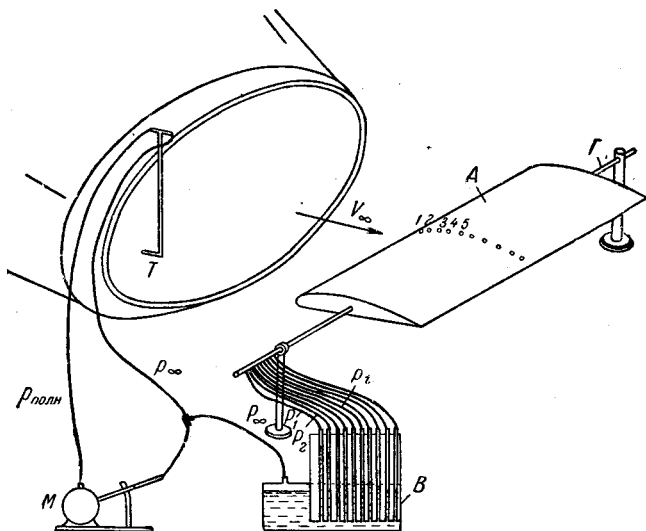


Рис. 3.26. Схема измерения распределения давлений по поверхности тела, находящегося в потоке.

$A$  — дренированная модель;  $T$  — скоростная трубка;  $B$  — батарейный микроманометр;  $\Gamma$  — крепление модели с помощью стальных лент или стержней.

резервуар микроманометра (бачок) также является общим для всех пьезометрических трубок. Такой микроманометр называется *батарейным микроманометром*.

С целью сокращения времени, необходимого для записи показаний пьезометрических трубок батарейного микроманометра, обычно применяют фотографирование пьезометрического щита. Схема измерения давлений с помощью дренированной модели и батарейного микроманометра представлена на рис. 3.26. Если в опыте к резервуару батарейного микроманометра подвести статическое давление в набегающем потоке  $p_\infty$  (например, от скоростной трубки, установленной далеко от испытываемой модели), то изменение высоты уровня жидкости в  $i$ -й пьезометрической трубке будет соответствовать разности давлений в  $i$ -м отверстии на поверхности модели и на беско-

нечности. Зная эту разность давлений  $p_i - p_\infty$ , плотность среды и скорость набегающего на модель потока, можно вычислить коэффициент давления

$$\bar{p}_i = \frac{p_i - p_\infty}{\rho_\infty V_\infty^2 / 2}.$$

Значительно более сложным является определение касательных напряжений. Для непосредственного измерения касательных сил на поверхности модели необходимо было бы вырезать из поверхности небольшие площадки, отделить их зазорами от остальной поверхности и прикрепить каждую площадку к динамометру, измеряющему усилия, касательные к площадке. Схема такого измерения изображена на рис. 3.27. Однако фактическое его осуществление довольно сложно, и оно применялось лишь для плоских поверхностей (дно понтона, плоская пластинка). Поэтому на практике применяют обычно иной, косвенный метод определения касательных напряжений, в котором непосредственно измеряются скорости вблизи поверхности тела, а касательные напряжения затем вычисляются по закону Ньютона. Как известно из предыдущего, касательное напряжение  $\tau_0$  на поверхности тела связано со скоростью вблизи поверхности следующей формулой:

$$\tau_0 = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial n} \right)_{n=0},$$

где  $\mu$  — коэффициент вязкости среды, а  $n$  — расстояние от поверхности. Отсюда видно, что, зная градиент скорости  $\partial v / \partial n$  у поверхности тела, можно найти и величину касательного напряжения  $\tau_0$ . Для того чтобы определить градиент скорости, необходимо измерить скорость  $v$  вблизи поверхности тела в ряде точек одной и той же нормали; тогда  $(\partial v / \partial n)_{n=0}$  можно будет найти графически, как тангенс угла  $\epsilon$  наклона к оси  $n$  касательной, проведенной к кривой распределения скоростей (рис. 3.28), или численным дифференцированием. Так как слой, состоящий из заторможенных у поверхности тела частиц среды (он называется пограничным слоем), весьма тонок (толщина его для модели обычно изменяется от 0 на носке модели до нескольких миллиметров вблизи хвоста), то измерители скорости

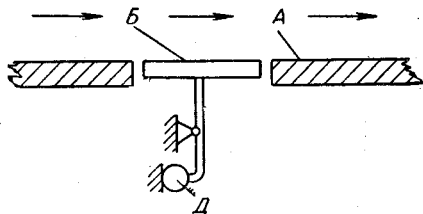


Рис. 3.27. Схема непосредственного измерения касательных усилий на поверхности тела, движущегося относительно среды.

А — поверхность тела; Б — площадка, вырезанная из поверхности; Д — динамометр.

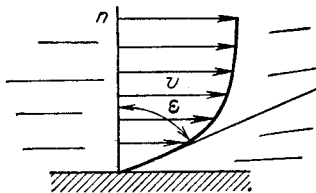


Рис. 3.28. Распределение скоростей в потоке среды вблизи поверхности неподвижного тела. На поверхности скорость равна нулю, при удалении от нее — быстро нарастает.  
 $\text{tg } \epsilon = (\partial v / \partial n)_{n=0}.$

должны иметь очень небольшие размеры. В качестве такого измерителя скорости применяют систему, состоящую из приемника полного давления, который может перемещаться с помощью микрометрического винта по нормали к поверхности, и приемника статического давления в виде отверстия на поверхности с нормальной к ней осью (рис. 3.29). Статическое давление, как будет показано в теории пограничного слоя (гл. VII), можно считать постоянной величиной в той части нормали к поверхности, которая находится внутри пограничного слоя. Поэтому разность между полным давлением внутри пограничного слоя и статическим давлением на поверхности, измеряемая с помощью микроманометра, равна динамическому давлению внутри пограничного слоя; зная это давление, можно вычислить скорость. В лабораторной практике трубочки, которые применяются в качестве приемников полного давления, имеют наружный диаметр порядка 0,2 — 0,5 мм и могут передвигаться по нормали к поверхности на расстояние порядка 0,01 мм. Эти размеры обеспечивают достаточную точность определения касательного напряжения на поверхности тела.

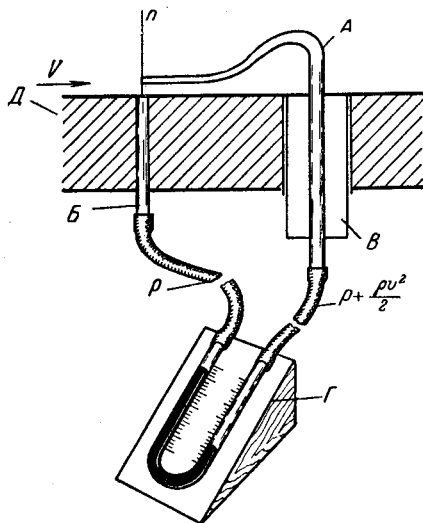


Рис. 3.29. Схема измерения скоростей вблизи поверхности модели.

А — приемник полного давления; Б — приемник статического давления; В — микрометрический винт; Г — микроманометр; Д — разрез стенки модели.

*теплоэлектроанемометром* (рис. 3.30). Он состоит из вилочки 1, в которой натянута тонкая платиновая или вольфрамовая нить. По нити пропускают электрический ток, и она нагревается. В потоке воздуха ее электрическое сопротивление по сравнению с сопротивлением в покоящейся среде изменяется. Для измерения сопротивления нити служит мост сопротивлений 2. Через усилитель 3 сигналы с моста сопротивлений поступают на регулятор тока моста 4 для автоматического поддержания постоянства температуры нити в потоке. Сигнал, управляющий регулятором, пропорционален осредненной скорости потока и измеряется вольтметром 5. Кроме того, сигнал от усилителя постоянного тока через емкость подается на усилитель переменного тока 6. Наличие емкости позволяет отделить пульсационную составляющую скорости. Эта составляющая после усиления и введения в нее коррекции тепловой инерции нити

подается либо на квадратичный вольтметр 7, показания которого пропорциональны средней квадратичной величине пульсационной составляющей скорости, либо на анализатор спектра колебаний 8, который позволяет определить частоты колебаний пульсационной

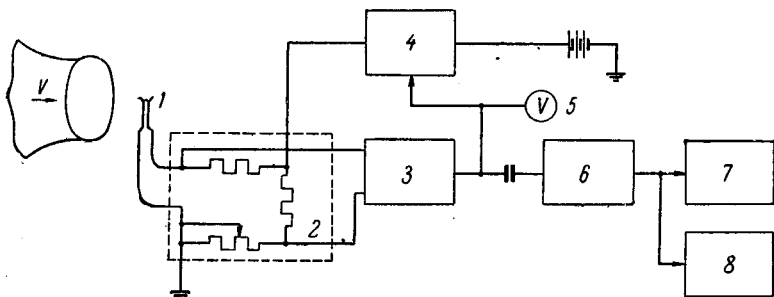


Рис. 3.30. Схема измерения скорости с помощью теплоэлектроанометра.

скорости. Зависимость между изменением электрического сопротивления и скоростью воздуха в том месте, где находится проволочка, определяется опытным путем, с помощью тарировки по другому измерителю скорости. Теплоэлектроанометр, в отличие от приемников полного и статического давления, является безынерционным прибором, и поэтому он пригоден и для измерения скоростей в неустановившемся потоке.

## § 9. Векторная и координатная диаграммы распределения давления

Распределение давления по поверхности тела, движущегося относительно среды, изображается графически с помощью диаграмм; применяются векторная и координатная диаграммы.

На векторной диаграмме, которая является наиболее наглядным способом изображения, коэффициенты давления (или избыточные давления) изображаются в виде векторов, нормальных к поверхности тела и направленных внутрь тела или наружу, смотря по тому, является коэффициент давления  $\bar{p}$  (или избыточное давление  $p - p_\infty$ ) положительным по знаку или отрицательным.

В простейшем случае, когда среда несжимаема, а тело (малой толщины по сравнению с длиной) имеет ось симметрии или плоскость симметрии и движется в среде параллельно этой оси или плоскости, векторная диаграмма распределения давления по поверхности тела имеет вид, представленный на рис. 3.31. Носовая точка тела является в этом случае точкой торможения потока; избыточное давление в этой точке, если среда несжимаема, равно  $\rho_\infty V_\infty^2/2$  и, следовательно, коэффициент давления равен единице. При удалении от носовой точки