

Отсюда следует, что коэффициент продольной силы, происходящей от трения  $c_{x_1 \text{ тр}}$ , для данного сечения крыла равен

$$c_{x_1 \text{ тр}} = \oint_{(L)} \bar{\tau} \cos(\tau, x_1) d\left(\frac{s}{b}\right). \quad (3.39)$$

Если  $\bar{\tau} = f(\bar{x}_1)$  задано в виде графика (рис. 3.76), то и этот интеграл удобно вычислять графически как сумму площадей, ограниченных кривыми  $\bar{\tau} = f(\bar{x}_1)$  для верхней и нижней частей контура профиля и крайними ординатами. При малых углах атаки  $c_{x_1} \approx c_x$ , и по формуле (3.39) можно определять также коэффициент лобового сопротивления, происходящего от трения.

## § 20. Динамометрический метод определения аэродинамических сил и моментов. Аэродинамические весы<sup>1)</sup>

Динамометрический метод определения аэродинамических сил и моментов состоит, как известно из предыдущего, в их измерении с помощью системы динамометров, на которых крепится испытываемая модель. Эта система динамометров вместе с креплением модели называется аэродинамическими весами. Аэродинамические весы являются основным измерительным устройством аэродинамической трубы.

Аэродинамические весы различаются по числу измеряемых компонентов. В зависимости от характера решаемой задачи это число может изменяться от одного до шести. При изучении обтекания симметричных относительно вертикальной плоскости моделей применяют однокомпонентные, двухкомпонентные и трехкомпонентные весы для измерения подъемной силы  $Y$ , лобового сопротивления  $Q$  и момента тангажа  $M_z$ . В этом случае аэродинамические весы снабжают механизмом, позволяющим изменять угол атаки  $\alpha$  модели в потоке. При необходимости изучения вопросов, связанных с поперечным управлением самолета, используются четырехкомпонентные весы, позволяющие, помимо  $Q$ ,  $Y$  и  $M_z$ , измерять также момент крена  $M_x$ . При исследовании пространственного обтекания моделей, когда необходимо знать три проекции аэродинамической силы ( $Q$ ,  $Y$  и  $Z$ ) и три проекции аэродинамического момента ( $M_x$ ,  $M_y$  и  $M_z$ ), применяют шестикомпонентные весы. В этом случае весы должны иметь механизмы, позволяющие изменять как угол атаки  $\alpha$ , так и угол скольжения  $\beta$ .

Аэродинамические весы измеряют компоненты аэродинамической силы и аэродинамического момента в заранее выбранной системе координатных осей, зависящей от конструкции весов. В большинстве случаев координатные оси весов совпадают с поточными осями (т. е. осями, связанными со скоростью набегающего потока). Но некоторые

<sup>1)</sup> Этот параграф написан И. И. Слезингером.

типы весов, применяемых в аэродинамических трубах малых скоростей, имеют поворотную раму, служащую для изменения угла скольжения модели. Такие весы осуществляют измерения в полусвязанных осях, получаемых из поточных путем поворота последних на угол скольжения  $\beta$ . Аэродинамические весы тензометрического типа, устанавливаемые внутри модели или на державке, крепящей модель сзади, измеряют компоненты в связанных осях. Определив проекции аэродинамической силы и момента в координатной системе данных аэродинамических весов, можно затем пересчитать их в другую координатную систему.

Основными узлами, встречающимися во всех конструкциях аэродинамических весов, являются следующие: 1) поддерживающее устройство, присоединяющее установленную в потоке модель к весам; 2) система разложения воспринимаемых моделью сил и моментов на их компоненты; 3) весовые элементы для отсчета измеряемых величин; 4) механизмы для изменения углов атаки и скольжения модели.

От конструкции подвески существенно зависит точность определения аэродинамических коэффициентов. Для большей точности производимых на весах измерений конструкция поддерживающих устройств должна отвечать двум условиям: 1) действующие на них аэродинамические силы (в первую очередь сила лобового сопротивления) должны быть малы по сравнению с силами, действующими на испытываемую модель; 2) они должны возможно меньше искажать обтекание модели набегающим потоком. Эти условия достигаются уменьшением площадей сечения подвесок до пределов, допустимых по соображениям прочности, и улучшением аэродинамической формы этих сечений; кроме того, находящиеся в потоке элементы подвесок заключают в обтекатели.

По способу присоединения модели к весам различают весы с гибкой (проволочной или ленточной) подвеской и весы с жестким креплением модели. Весы с гибкой подвеской в основном используются в аэродинамических трубах малых скоростей. В трубах околосвуковых скоростей иногда применяют так называемую стреловидную ленточную подвеску, состоящую из лент, наклоненных к потоку под некоторым углом для уменьшения волнового сопротивления лент.

В аэродинамических трубах малых и околосвуковых скоростей часто применяют весы с тремя жесткими стойками (рис. 3.77). Модель крепится к стойкам на шарнирах, вращением относительно оси которых можно изменять угол атаки. Координатную ось  $Oz$  весов обычно совмещают с осью передних шарниров, а начало координат  $O$  помещают посередине между ними.

В аэродинамических трубах сверхзвуковых скоростей модели крепят чаще всего при помощи жестких хвостовых державок.

Системы разложения сил в аэродинамических весах можно разделить на три основных типа: рычажные системы, гидравлические (или пневматические) системы и системы, основанные на деформациях упру-

гих элементов. Иногда применяются конструкции весов, в которых осуществлены различные комбинации этих систем.

Во всех конструкциях аэродинамических весов механического типа системы разложения сил представляют собой механизмы, которые обеспечивают модели число степеней свободы, равное числу измеряемых компонентов. Для измерения компонентов аэродинамической силы модель должна иметь степени свободы поступательного перемещения

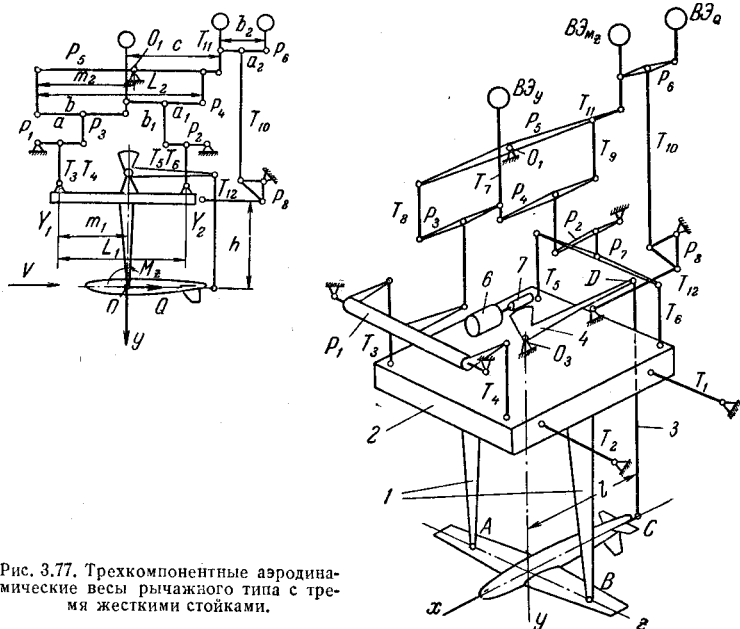


Рис. 3.77. Трехкомпонентные аэродинамические весы рычажного типа с тремя жесткими стойками.

в направлении этих компонентов, а для измерения компонентов аэродинамического момента — степени свободы вращательного перемещения относительно соответствующих осей.

В качестве весовых элементов для измерения компонентов сил применяют самые разнообразные динамометрические устройства. В старых конструкциях аэродинамических весов в качестве весового элемента чаще всего применялись коромысловые весы с ручным уравновешиванием и циферблатные весы. Уравновешивание каждого из весовых элементов и отсчет на нем осуществлялись одним экспериментатором. Число экспериментаторов обычно должно было быть не меньше числа отсчитываемых компонентов. Для согласования моментов отсчетов приходилось применять сигнализацию, которая, вследствие колебания нагрузок, не всегда могла обеспечить одновременность и точность всех измерений.

В связи с большими мощностями современных аэродинамических труб и необходимостью ускорения эксперимента и повышения его

точности в настоящее время измерения в аэродинамических трубах осуществляются автоматически. Измеренные величины передаются дистанционно на пульт в кабине управления, где они печатаются в виде таблиц и регистрируются в виде графиков. Многие современные аэродинамические трубы оборудованы электронными вычислительными машинами, обрабатывающими измеряемые данные и выдающими окончательные значения аэродинамических коэффициентов непосредственно в ходе эксперимента.

Рассмотрим некоторые, наиболее часто встречающиеся в лабораторной практике схемы аэродинамических весов.

а) Трехкомпонентные весы с жестким поддерживающим устройством

На рис. 3.77 приведена типичная схема трехкомпонентных аэродинамических весов с рычажной системой разложения сил и жесткой подвеской модели. Модель соединяется шарнирами  $A$  и  $B$  с двумя обтекаемыми стойками  $1$ , установленными на «плавающей» раме  $2$ . Расстояние между шарнирами  $A$  и  $B$  называется поперечной базой модели. Это расстояние можно изменять для разных типов и размеров моделей путем перестановки стоек  $1$  на раме  $2$  в плоскости  $yz$ . Для изменения угла атаки служит подвижная стойка  $3$ , соединяющая шарнир  $D$  поворотного рычага  $4$  механизма угла атаки с задним шарниром  $C$  модели. Рычаг  $4$  поворачивается относительно оси  $O_3$  при помощи электродвигателя  $6$  через червячный редуктор  $7$ . Продольная база модели может изменяться путем перестановки шарнира  $D$  в различные точки по длине рычага  $4$ .

Для уменьшения сопротивления стоек  $1$  и  $3$  в потоке их закрывают обтекателями, которые жестко укреплены на стенках аэродинамической трубы.

Разложение силы и момента, действующих на модель, осуществляется плавающей рамой  $2$ , системой рычагов  $P_1, \dots, P_8$  и тяг  $T_3 - T_{12}$ . Тяги  $T_1$  и  $T_2$  служат для лишения плавающей рамы свободы поступательного перемещения в направлении, параллельном оси  $Oz$ , и свободы вращательного перемещения относительно оси  $Oy$ . Рычаг  $P_1$  имеет конструкцию, предотвращающую возможность поворота рамы относительно оси, параллельной оси  $Ox$ . Таким образом, плавающая рама лишена степеней свободы в направлении действия компонентов  $Z, M_x$  и  $M_y$ , которые не измеряются данными весами.

Схема расположения сил показана отдельно на рис. 3.77, где приведены обозначения плеч рычагов, входящих в приводимые ниже уравнения. На рычаги  $P_1$  и  $P_2$  передаются нагрузки  $Y_1$  и  $Y_2$ , определяемые соотношениями

$$Y_1 = Y \left( 1 - \frac{m_1}{L_1} \right) - \frac{M_z}{L_1},$$

$$Y_2 = Y \frac{m_1}{L_1} + \frac{M_z}{L_1}.$$

Рычаги  $P_1$  и  $P_2$  имеют одинаковые соотношения плеч  $i_1$ . Поэтому на средние шарниры рычагов  $P_3$  и  $P_4$  передаются соответственно нагрузки  $i_1 Y_1$  и  $i_1 Y_2$ . Каждый из рычагов  $P_3$  и  $P_4$  подвешен одним шарниром к тяге  $T_7$ , а другим — к тягам  $T_8$  и  $T_9$ , соединенным с противоположными концами рычага  $P_5$ , установленного на неподвижной шарнирной опоре  $O_1$ . Рычаги  $P_3$  и  $P_4$  имеют одинаковые соотношения плеч  $a/b = a_1/b_1 = i_2$ , поэтому на тягу  $T_7$  действует нагрузка, равная  $N_y = (i_1 Y_1 + i_1 Y_2) i_2 = i_1 i_2 Y$ . Тяга  $T_7$  присоединена к весовому элементу  $B\mathcal{E}_y$ , который воспринимает, таким образом, нагрузку, пропорциональную подъемной силе. Рычаг  $P_5$  служит для измерения момента тангажа  $M_z$ . Если начало координат весов  $O$  и точка опоры рычага  $P_5$  помещены так, что

$$\frac{L_1}{m_1} = \frac{L_2}{m_2},$$

то на тягу  $T_{11}$ , соединенную с весовым элементом  $B\mathcal{E}_{M_z}$ , передается нагрузка, равная

$$N_{M_z} = M_z \frac{1 - i_2}{c} \frac{L_2}{L_1}.$$

Действующая на модель сила лобового сопротивления  $Q$  воспринимается горизонтальной тягой  $T_{12}$  и через равноплечий угловой рычаг  $P_8$  и рычаг  $P_6$  передается на весовой элемент  $B\mathcal{E}_Q$ . Рычаг  $P_6$  служит для компенсации реактивного момента  $M_R = Qh$ , вызванного реакцией силы, действующей по тяге  $T_{12}$ , присоединенной к плавающей раме на расстоянии  $h$  от плоскости  $xz$ . От действия реактивного момента нагрузка на весовой элемент  $B\mathcal{E}_Q$  уменьшается на величину

$$N_R = M_R \frac{1 - i_2}{c} \frac{L_2}{L_1}.$$

Нетрудно видеть, что если отношение плеч рычага  $P_6$  выбрать так, чтобы

$$\frac{a_6}{b_6} = (1 - i_2) \frac{L_2}{L_1} \frac{h}{c},$$

то на весовой элемент  $B\mathcal{E}_{M_z}$  будет действовать дополнительная нагрузка, равная, но обратная по знаку нагрузке, вызываемой реактивным моментом  $M_R$  и, следовательно, показания весового элемента  $B\mathcal{E}_Q$  будут зависеть лишь от величины момента  $M_z$ . В некоторых конструкциях весов плавающая рама окружает рабочую часть аэродинамической трубы, что дает возможность присоединить две тяги для восприятия  $Q$  в плоскости  $xz$  вне потока. В этом случае надобность в компенсационном рычаге  $P_6$  отпадает, так как  $h = 0$ .

б) Шестикомпонентные аэродинамические весы с гибким поддерживающим устройством

На рис. 3.78 приведена схема аэродинамических весов ЦАГИ для трубы малых скоростей с открытой рабочей частью. Весы установлены на верхней платформе тележки, которая может выкатываться за пределы рабочей части аэродинамической трубы. Тележка располагается на поворотном круге, при помощи которого (поворачивая всю тележку) можно устанавливать модель в потоке под различными углами скольжения  $\beta$ .

Испытываемая модель подвешивается к весам в узлах  $A$ ,  $B$  и  $C$  в перевернутом положении при помощи лент обтекаемого сечения. Горизонтальные ленты  $AD$  и  $BE$  воспринимают силу лобового сопротивления модели. В узлах  $D$  и  $E$  ленты соединяются с наклонными растяжками, закрепленными в неподвижных точках  $H$  и  $F$  и с вертикальными лентами  $L_1$  и  $L_2$ , соединенными с горизонтальной траверсой  $T_1$ . Контргрузы  $G_1$ ,  $G'_1$ ,  $G_2$ ,  $G'_2$  и  $G_3$  служат для предварительного натяжения всех лент. Аэродинамические нагрузки на модель вызывают в тросах  $AD$  и  $BE$  соответственно усилия

$$X_1 = \frac{Q}{2} + \frac{M_y}{l}$$

и

$$X_2 = \frac{Q}{2} - \frac{M_y}{l},$$

где  $l$  — поперечная база модели, равная расстоянию  $AB$ . Так как наклонные ленты  $DH$  и  $EF$  образуют угол  $135^\circ$  с горизонтальными и вертикальными лентами, то горизонтальные силы  $X_1$  и  $X_2$  полностью передаются на траверсу  $T_1$ . Поэтому на траверсу  $T_1$  действует вертикальная нагрузка, равная  $X_1 + X_2 = Q$ , а момент относительно ее середины, лежащей в плоскости симметрии  $xu$ , равен  $M_y$ . Измерение  $Q$  осуществляется при помощи рычагов  $P_1$  и  $P_2$  и промежуточного рычага  $P_3$ , соединенного с весовым элементом  $B\Delta Q$ , а измерение  $M_y$  — при помощи моментного рычага  $P_5$ , соединенного с весовым элементом  $B\Delta M_y$ .

Подъемная сила воспринимается лентами  $L_3$ ,  $L_4$  и  $L_5$  в передних узлах  $A$  и  $B$  и лентой  $L_6$  в заднем узле  $C$ . Часть подъемной силы  $Y_1$ , действующая в узле  $A$ , воспринимается траверсой  $T_2$ , а часть подъемной силы  $Y_2$ , действующая в узле  $B$ , воспринимается траверсой  $T_3$ . Траверсы  $T_2$  и  $T_3$  подвешены соответственно к суммирующим рычагам  $P_{10}$  и  $P_{11}$ . Кроме того, ленты  $L_3$  и  $L_4$  полностью передают на траверсу  $T_2$  поперечную силу  $Z$ , которая воспринимается весовым элементом  $B\Delta Z$  через промежуточные рычаги  $P_6$ ,  $P_7$  и  $P_8$ . Траверсы  $T_1$  и  $T_2$  введены в конструкцию для того, чтобы обеспечить возможность изменения поперечной базы модели  $l$ . Часть подъемной силы

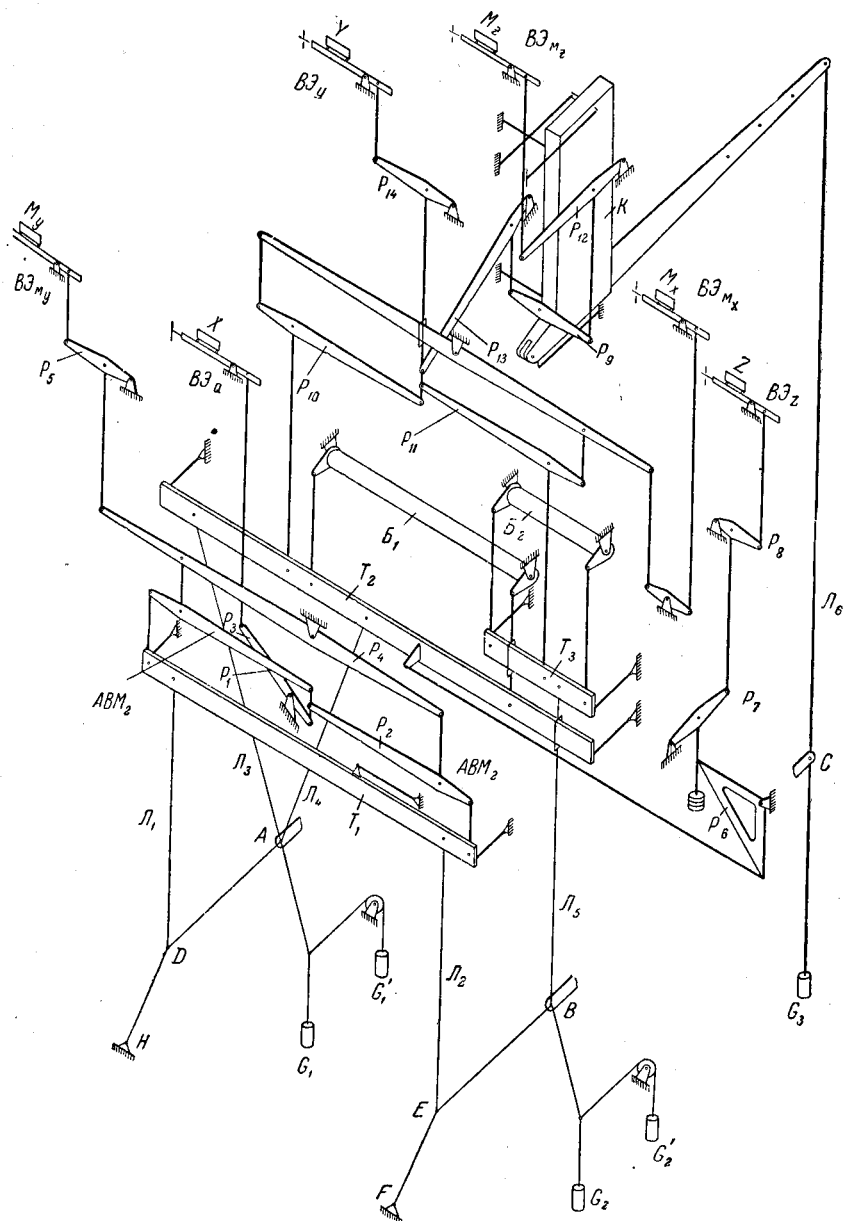


Рис. 3.78. Схема шестикомпонентных аэродинамических весов для трубы малых скоростей.

$Y_3 = M_z/L \cos \alpha$  (где  $L$  — продольная база модели), действующая в узле  $C$ , воспринимается лентой  $L_6$ . Последняя присоединена верхним концом к поворотной штанге механизма угла атаки. Корпус  $K$  этого механизма подвешен к рычагу  $P_9$ , один конец которого связан с весовым элементом  $BЭ_{M_z}$  (через промежуточный рычаг  $P_{12}$ ), а другой — с третьим суммирующим рычагом  $P_{13}$ . Нагрузка, передаваемая корпусом  $K$  рычагу  $P_9$ , равна силе  $Y_3$ , так как пять горизонтальных стержней, связывающих корпус с неподвижными точками, лишают ее всех

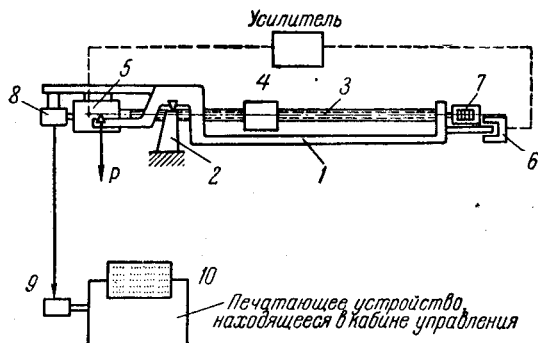


Рис. 3.79. Схема автоматического рычажного весового элемента.

степеней свободы, за исключением свободы вертикального перемещения. Рычаги  $P_{10}$ ,  $P_{11}$  и  $P_{13}$  имеют одинаковые отношения плеч, и поэтому сила, действующая по тяге, соединяющей все эти рычаги через промежуточный рычаг  $P_{14}$  с весовым элементом  $BЭ$ , пропорциональна  $Y_1 + Y_2 + Y_3 = Y$ . Зная тарировочные коэффициенты  $K_X \dots K_{M_z}$  и показания весовых элементов в момент отсчета и до эксперимента ( $n_i$  и  $n_{i0}$ ), можно вычислить компоненты аэродинамических сил, действующих на модель, по формулам

$$Q = K_X(n_X - n_{X0}) - Q_{\text{подв}}; \quad M_x = K_{M_x}(n_{M_x} - n_{M_{x0}}) - M_{x \text{ подв}}$$

и аналогично для других компонентов.

Здесь  $Q_{\text{подв}}$ , ...,  $M_{z \text{ подв}}$  — дополнительные составляющие аэродинамических сил, создаваемые подвеской; они определяются путем ее продувки без модели.

В описываемых аэродинамических весах силы измеряются автоматическими рычажными весовыми элементами. Автоматический весовой элемент (рис. 3.79) состоит из рычага (коромысла) 1, который может покачиваться относительно опоры с малым трением 2. В качестве опоры чаще всего применяют призмные шарниры. Измеряемая сила  $P$  воспринимается шарниром на левом плече коромысла. На правом



плече последнего, при помощи точного ходового винта 3, может перемещаться груз 4. Ходовой винт связан с реверсивным сервомотором 5, который включается датчиком 6, реагирующим на перемещение правого конца коромысла 1. При увеличении нагрузки правый конец коромысла перемещается вверх, датчик 6 включает сервомотор, который начинает вращаться в таком направлении, чтобы ходовой винт перемещал груз 4 вправо, вследствие чего равновесие коромысла восстанавливается. В момент равновесия сервомотор останавливается. При уменьшении нагрузки конец коромысла перемещается вниз, датчик включает сервомотор в обратном направлении, и груз 4 перемещается влево до нового положения равновесия. В качестве датчика перемещения 6 применяют контактные, индуктивные и фотоэлектрические чувствительные устройства. Отсчет величины нагрузки осуществляется цифровым счетчиком 7 по углу поворота ходового винта. Для получения отсчетов на экспериментальном пульте весовые элементы снабжают сельсинной синхронной передачей. С валом сервомотора соединяют сельсин-датчик 8, который электрически связывают с приемным сельсином 9, находящимся на пульте 10. При помощи приемных сельсинов показания счетчиков, находящихся на весовых элементах, повторяются на счетчиках, установленных на пульте. Показания всех весовых элементов автоматически печатаются на ленте в виде цифровых таблиц одновременно с показаниями приборов, измеряющих давление, температуру, угол атаки модели и т. д.

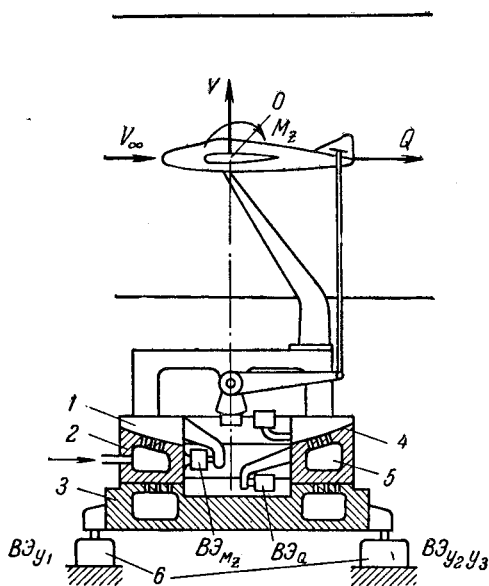


Рис. 3.80. Схема аэродинамических весов с гидравлической системой разложения сил.

#### в) Аэродинамические весы с гидравлической системой разложения сил

В некоторых больших аэродинамических трубах околосвуковых скоростей применяются весы, в которых разложение сил осуществляется при помощи опор подшипников, выдерживающих очень большие нагрузки при почти полном отсутствии сил трения.

Схема аэродинамических весов этого типа показана на рис. 3.80. Основными узлами весов являются три плавающие рамы 1, 2, 3.

На верхней плавающей раме 1 находится трехстоечное поддерживающее устройство модели и механизм изменения ее угла атаки. Модель установлена не в перевернутом (как в предыдущих схемах), а в прямом положении, и положительная подъемная сила действует вверх.

Для измерения моментов относительно всех трех осей рама 1 снабжена опорными подшипниками 4, имеющими форму сферы, очерченной из начала координат весов

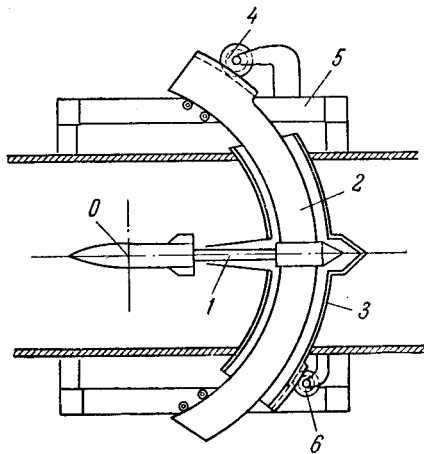


Рис. 3.81. Схема крепления модели к весам в сверхзвуковой аэродинамической трубе.

О. Подушки покоятся на опорах, тщательно шлифованных к поверхности подушек. Во время измерения в распределительные камеры 5, находящиеся в опорах, непрерывно подается масло, которое через многочисленные отверстия поступает к сферическим поверхностям подушек и опор. Вес рамы 1 воспринимается пленкой жидкости, образующейся на поверхностях соприкосновения. Рама 1 как бы всплывает на этой пленке и может с ничтожным трением поворачиваться в любом направлении по отношению к раме 2. Соединив раму 1 с весовыми элементами, установленными на промежуточной раме 2, можно измерить каждый из моментов  $M_x$ ,  $M_y$  и  $M_z$ . Для простоты на рис. 3.81 показан лишь весовой элемент для измерения  $M_z$ . Для измерения компонент  $Q$  и  $Z$  промежуточная рама должна иметь возможность перемещения в горизонтальной плоскости. Это обеспечивается при помощи устройства, совершенно аналогичного по конструкции устройству для вращательных перемещений и отличающемуся лишь тем, что в нем поверхности соприкосновения подушек и опор на рамах 2 и 3 являются плоскостями. Нижняя рама 3, на которой расположены опоры, покоится на трех динамометрах 6, служащих для измерения подъемной силы.

#### г) Аэродинамические весы тензометрического типа

При больших скоростях потока взаимное влияние поддерживающих устройств и модели настолько велико, что полностью учесть его не всегда представляется возможным.

Одним из способов уменьшения взаимного влияния является применение поддерживающего устройства в виде цилиндрического или

конического стержня, соединяющего хвостовую часть модели со стойкой. На рис. 3.81 показана схема такого поддерживающего устройства, применяемая в аэродинамических весах механического типа, имеющих плавающую раму, которая охватывает кольцом рабочую часть трубы. Стержень 1 соединяет модель со стойкой 2, имеющей контуры, очерченные по радиусу из начала координат весов  $O$ , относительно которого стойка поворачивается для изменения угла атаки модели. Механизм изменения угла атаки 4, так же как и стойка, установлен на плавающей раме весов 5. Стержень 1 и стойка 2

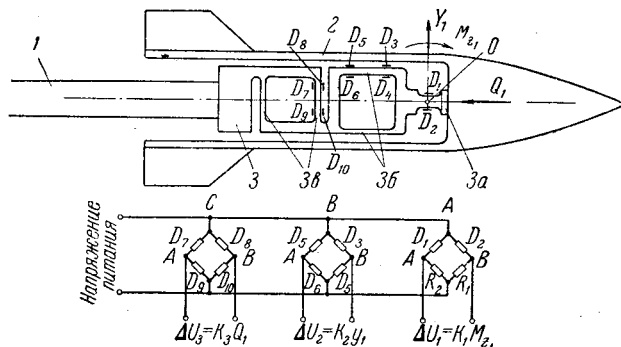


Рис. 3.82. Схема трехкомпонентных аэродинамических весов тензометрического типа.

заклучены в дугообразный обтекатель 3, который может поворачиваться в стенках рабочей части механизмом 6 синхронно с поворотом стойки.

За последние годы широкое распространение получили аэродинамические весы, в которых применены проволочные датчики сопротивления (тензодатчики). Последние служат для измерения малых относительных деформаций упругих элементов. Тензодатчики позволяют осуществить конструкции аэродинамических весов, целиком размещаемые внутри исследуемой модели. При установке весов внутри модели аэродинамические силы, действующие на державку, не измеряются весами, и державка лишь несколько искажает обтекание модели потоком. Аэродинамические весы тензометрического типа обладают существенно меньшими точностями и более капризны в работе, чем описанные выше конструкции механических весов. Но аэродинамические преимущества, связанные с установкой весов внутри модели (или в хвостовой державке), настолько велики, что в настоящее время тензометрические весы применяют почти во всех сверхзвуковых аэродинамических трубах.

Одна из конструкций трехкомпонентных аэродинамических весов тензометрического типа дана на рис. 3.82. Державка 1 связана с моделью 2 посредством упругого элемента 3, выфрезерованного из одного стального бруска. Утоньшение 3а в передней части упругого элемента

служит для измерения продольного момента. На поверхность этого элемента наклеены тензодатчики  $D_1$  и  $D_2$ , которые включены в цепь моста Уитстона  $A$ , так, как показано на рисунке снизу.  $R_1$  и  $R_2$  — одинаковые постоянные сопротивления. Электрическое напряжение  $\Delta U_1$  на измерительной диагонали  $AB$  пропорционально изгибающему моменту в балочке  $3a$ , который равен  $M_{z1}$  в случае, если начало координат весов поместить в точку  $O$ , находящуюся в середине балочки. Передний упругий параллелограмм служит для измерения нормальной силы  $Y_1$ , приложенной в точке  $O$ . На тонкие горизонтальные балочки  $3б$  этого параллелограмма наклеены тензодатчики  $D_3, \dots, D_6$ , включенные в цепь моста  $B$ . Напряжение  $\Delta U_2$  на измерительной диагонали этого моста пропорционально  $Y_1$ . Для измерения тангенциальной силы сопротивления  $Q_1$  служат вертикальные балочки  $3в$  заднего упругого параллелограмма, на которые наклеены тензодатчики  $D_7, \dots, D_{10}$ , включенные в мост  $C$ .

В современных аэродинамических трубах напряжения  $\Delta U_1, \Delta U_2$  и  $\Delta U_3$ , пропорциональные измеряемым компонентам, определяются с помощью автоматических устройств, позволяющих получать результаты измерений в цифровой форме.

## § 21. Определение аэродинамической силы методом импульсов. Спутная струя за телом

До сих пор мы рассматривали аэродинамические силы и моменты как результирующие элементарных сил и моментов, распределенных по поверхности обтекаемого тела. Однако можно определить аэродинамические силы и моменты другим способом, не зная распределения напряжений по поверхности тела. Для этой цели ограничим некоторой замкнутой поверхностью  $\Sigma$  конечный объем среды, включающий и данное тело. Рассмотрим объем среды, ограниченный поверхностями  $\Sigma$  и поверхностью  $S$  данного тела. Применим к этому объему теорему об изменении количества движения, которая, как известно, гласит: изменение количества движения материальной системы за некоторый промежуток времени равно импульсу внешних сил, действующих на материальную систему. Внешними силами, действующими на выделенный объем, если пренебречь объемными силами, будут поверхностные силы, распределенные по поверхностям  $\Sigma$  и  $S$ . Последние, т. е. силы, распределенные по поверхности  $S$ , являются реакциями обтекаемого тела. Следовательно,

$$\Delta I = F \Delta t,$$

где  $\Delta I$  есть изменение количества движения среды в выделенном объеме за время  $\Delta t$ .

В дальнейшем (гл. V) будет доказано, что при установившемся течении изменение количества движения жидкого объема за какой-либо промежуток времени равно количеству движения, протекающему