

# Аэродинамические весы

Основным измерительным устройством аэродинамических труб, позволяющим определять составляющие полных аэродинамических сил и моментов, являются аэродинамические весы, на которых крепятся модели.

Аэродинамические весы - это система динамометров вместе с креплением модели и устройством изменения углов атаки и скольжения. В отличие от обычных весов, которыми измеряют силы, действующие в известном направлении, аэродинамические весы (АВ) предназначены для измерения не только сил, направление равнодействующей которых известно, но и моментов сил относительно выбранной ортогональной системы осей.

Аэродинамические весы можно классифицировать следующим образом.

Во-первых, по числу измеряемых компонент.

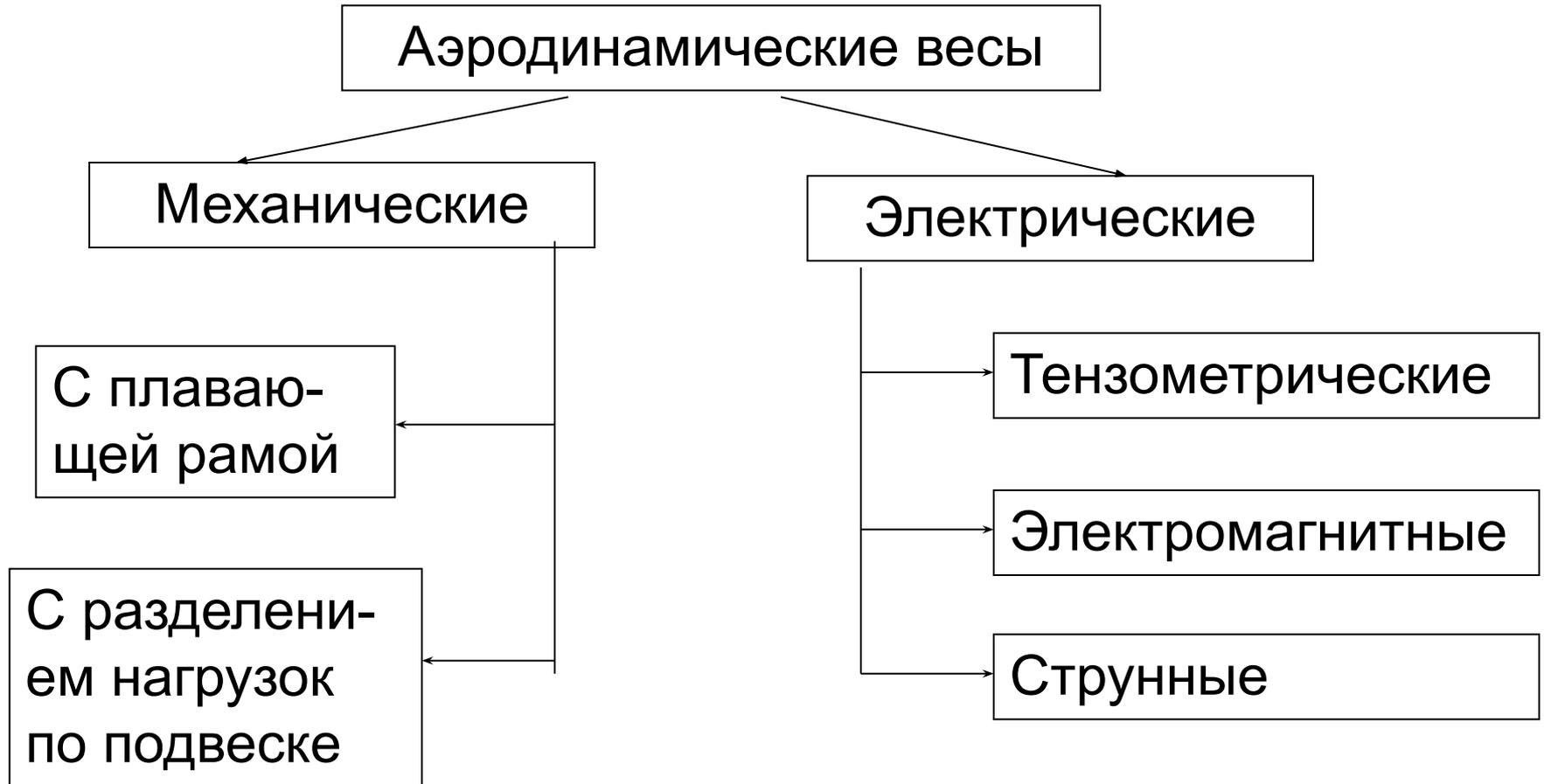
В зависимости от поставленной задачи это число может изменяться от одного до шести.

При решении плоской задачи (симметричная модель и угол скольжения  $\beta = 0$ ) используются трёхкомпонентные весы, измеряющие силу сопротивления, подъёмную силу и момент тангажа.

Вопросы, связанные с поперечным управлением летательного аппарата, предполагают использование четырёхкомпонентных весов, позволяющих измерять ещё и момент крена  $M_x$ .

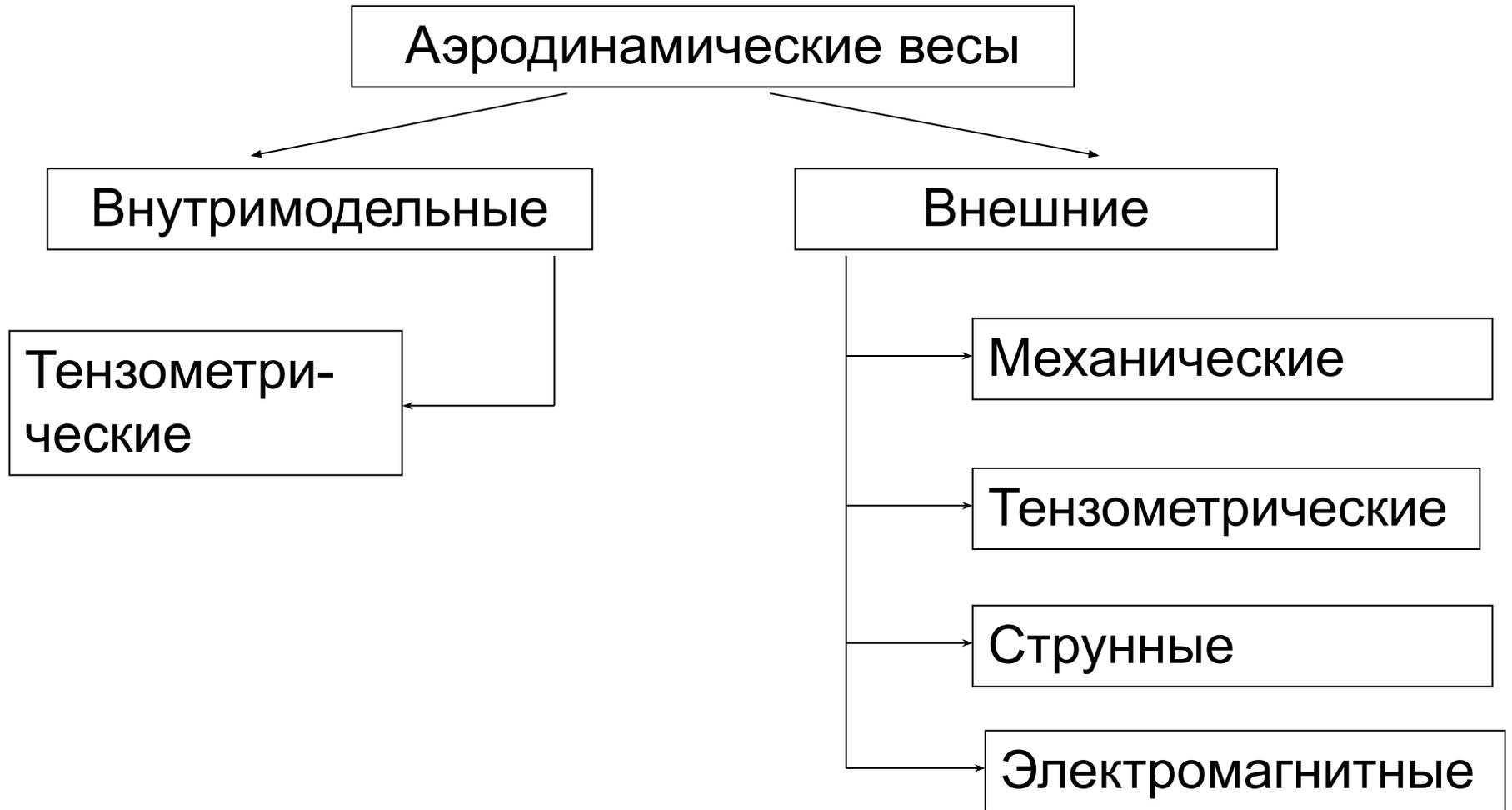
При решении некоторых частных задач применяются также одно- и двухкомпонентные весы чаще всего для измерения силы сопротивления и подъёмной силы или одной из составляющих момента

# Аэродинамические весы (по принципу действия)



- В весах механического типа разложение полной аэродинамической силы и момента осуществляется при помощи различных механизмов.
- Тензометрические методы измерения сил основаны на использовании упругих систем, деформации которых пропорциональны механическим напряжениям, а следовательно, силам и моментам, и определяются при помощи малогабаритных электрических тензометров. Тензодатчики позволяют получать электрические сигналы, величины которых являются простейшими функциями сил и моментов.
- В последние десятилетия получили дальнейшее развитие и распространение электромагнитные весы. В магнитной подвеске связь между моделью и динамометрическими устройствами осуществляется при помощи магнитного поля. В этом случае модель изготавливается из магнитного материала и подвешивается так, чтобы аэродинамические и гравитационные силы уравнивались силами, создаваемыми электромагнитами. Управление ими, позволяет также изменять углы атаки. При этом рабочая часть изготавливается из немагнитного материала. Ток в электромагнитных катушках, создающих магнитное поле, регулируется автоматически. Для измерения давления, температуры, теплового потока и некоторых других параметров используется телеметрия, т. е. внутри модели устанавливаются небольшие радиопередатчики, которые транслируют результаты измерений. Отсутствие в потоке державок и других подвесных устройств модели является весьма существенным преимуществом весов с электромагнитной подвеской. Именно это обстоятельство стимулирует в последние годы развитие таких систем. Регулярно обсуждению весов с магнитной системой подвески посвящаются специальные международные конференции.
- Другой разновидностью АВ электрического типа являются струнные весы. Они основаны на известной зависимости частоты от деформации, а следовательно, от сил и моментов. В этом случае на упругие элементы натягиваются две струны диаметром 0,03 мм и измеряется разность частот. Наличие линейной зависимости разности частот от деформаций позволяет получать электрические сигналы, пропорциональные силам и моментам, Преимущество весов такого типа – чрезвычайное быстродействие и малые габариты.

# Аэродинамические весы (по расположению)



# Основные элементы механических весов

- поддерживающие устройства, служащие для установки модели в потоке; .
- плавающая рама (или подвеска), предназначенная для крепления поддерживающих устройств и для восприятия сил, действующих на модель;
- механическая (рычажная) система разложения сил, воспринятых плавающей рамой (или подвеской);
- весовые элементы или динамометры, соединяемые с выходными звеньями системы разложения сил;
- механизм для изменения углов атаки и/или скольжения.

# 1. Поддерживающие устройства.

По конструкции различают весы с жёсткой и гибкой подвеской модели.

В весах с жёсткой подвеской модель крепится к плавающей раме при помощи жёстких стоек или державок.

В весах с гибкой подвеской модель крепится посредством лент, тросов или пружин. Проволочные подвески, впервые применённые Прандтлем в аэродинамических весах его конструкции [3], до сих пор используются в некоторых трубах малых скоростей.

Особенностью многих аэродинамических весов с проволочной подвеской является отсутствие плавающей рамы, так как сами проволоки (или ленты), натянутые специальными контргрузами, могут служить звеньями весового механизма разложения сил.

**Плавающая рама** весов предназначена для восприятия аэродинамической силы и момента, действующих на модель, и служит для крепления саблевидной подвески.

Испытываемая модель часто устанавливается в рабочей части АДТ в перевернутом положении, так что положительная подъёмная сила складывается с силой веса модели и плавающей рамы. В этом случае весы располагают над рабочей частью трубы. При этом вес плавающей рамы выбирается так, чтобы при максимальном отрицательном значении подъёмной силы модели шарниры и звенья механизмов разложения сил испытывали некоторую нагрузку, необходимую для сохранения кинематических связей. Типичным примером такой схемы является плавающая рама аэродинамических весов АДТТ-313. .

В крупных аэродинамических трубах модель обычно устанавливается в прямом «лётном» положении. В таких случаях вес испытываемых моделей велик, и выгодно повесить точность измерений, несколько разгрузив плавающую раму направленной вверх подъёмной силой. Кроме того, при больших размерах рабочей части размещение весов над ней усложняет конструкцию опорных; устройств. Аэродинамические весы такой конструкции используются в АДТ Т-101, Т-104 ЦАГИ

## Механическая система разложения сил .

Различают два типа механизмов разложения сил:

- 1) весы, в которых нагрузки, воспринимаемые одним или несколькими весовыми элементами (ВЭ), зависят от двух или более компонент;
- 2) весы, в которых каждый весовой элемент воспринимает нагрузку, пропорциональную лишь одной определённой компоненте.

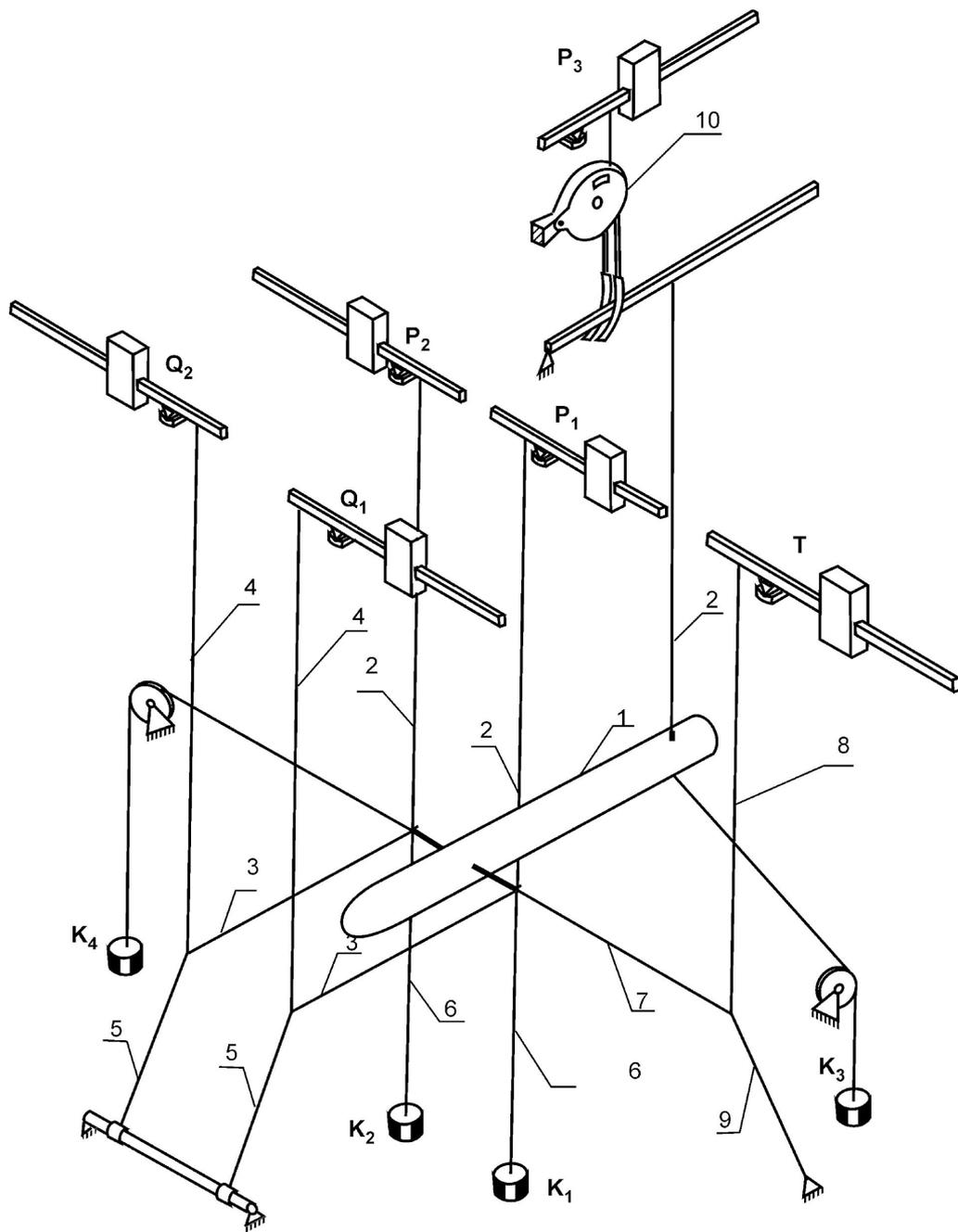
В весах первого типа нагрузки, воспринимаемые ВЭ, являются функцией сумм или разностей двух или более компонент. Следовательно, для определения каждой компоненты требуется произвести некоторые вычисления, что затрудняет наблюдение за экспериментом и его обработку. Правда, система разложения сил таких весов более проста по сравнению с весами второго типа.

Такие весы применялись в лаборатории Н.Е. Жуковского в МВТУ им. Баумана и в лаборатории Эйфеля во Франции. В весах второго типа каждый ВЭ предназначен для измерения одной компоненты. Такие весы требуют применения более сложных механизмов разложения сил, но их преимуществом является простота обработки результатов измерений и возможность непосредственного наблюдения за экспериментом. Это весьма важно, в современных трубах большой мощности, где необходимо стремиться к максимальной надёжности проведения опытов.

Для независимого измерения каждой из компонент одним весовым элементом должны выполняться следующие условия. Работа компоненты полной аэродинамической силы и полного аэродинамического момента на существующем перемещении модели должна быть равна работе силы, действующей на весовой элемент на его измерительном перемещении.

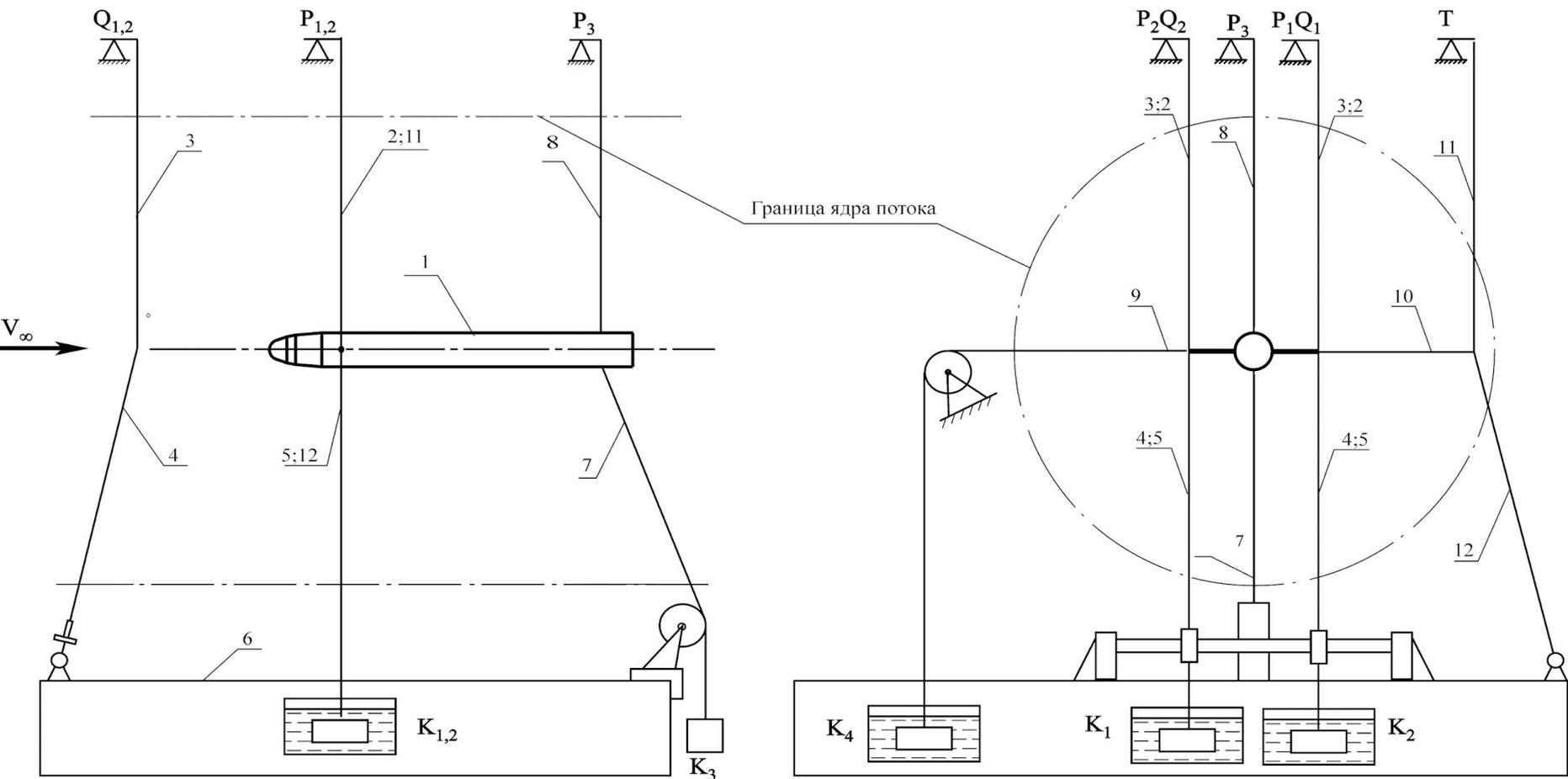
Кинематически эти условия означают, что при малом поступательном перемещении или повороте модели параллельно или относительно какой-либо оси должно перемещаться соответствующее звено, которое связывает весовую систему с ВЭ, предназначенным для измерения компоненты, действующей по направлению или относительно этой оси. Если отсоединить ВЭ от механизма разложения сил, то модель будет иметь число степеней свободы, равное числу измеряемых компонент. Поэтому ВЭ присоединяется к такой точке механизма, закрепление которой лишает модель одной степени свободы.

Таким образом, независимое измерение компонент можно осуществить, применяя механизмы, обеспечивающие свободу поступательных перемещений модели параллельно осям для измерения сил и свободу вращательных относительно осей координат для измерения моментов. Следовательно, число степеней свободы механизма должно быть равно числу измеряемых компонент. Такие системы могут быть образованы из механизмов поступательного или вращательного перемещения и комбинированных механизмов



Весовая часть аэродинамических весов БКТ-1 с двухпанельной подвеской

- 1 – модель,
- 2 – тяги  $P_{1,2,3}$ ,
- 3 - горизонтальные тяги  $Q_{1,2}$ ,
- 4 - вертикальные тяги  $Q_{1,2}$ ,
- 5 - наклонные тяги  $Q_{1,2}$ ,
- 6 - тяги контргрузов  $K_{1,2,3,4}$ ,
- 7- горизонтальная тяга  $T$ ,
- 8 – вертикальная тяга  $T$ ,
- 9 – наклонная тяга  $T$ ,
- 10 -  $\alpha$ -механизм



- |                                  |                                |                            |                               |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1. Модель.                       | 4. Наклонные тяги $Q_{1,2}$ .  | 7. Тяга контргруза $K_3$ . | 10. Горизонтальная тяга $T$ . |
| 2. Тяга $P_{1,2}$ .              | 5. Тяга контргруза $K_{1,2}$ . | 8. Тяга $P_3$ .            | 11. Вертикальная тяга $T$ .   |
| 3. Вертикальные тяги $Q_{1,2}$ . | 6. Платформа весов.            | 9. Тяга контргруза $K_4$ . | 12. Наклонная тяга $T$ .      |

Рис 2.2 Схема установки модели УАБ на двухпанельной подвеске весов БКТ-1.

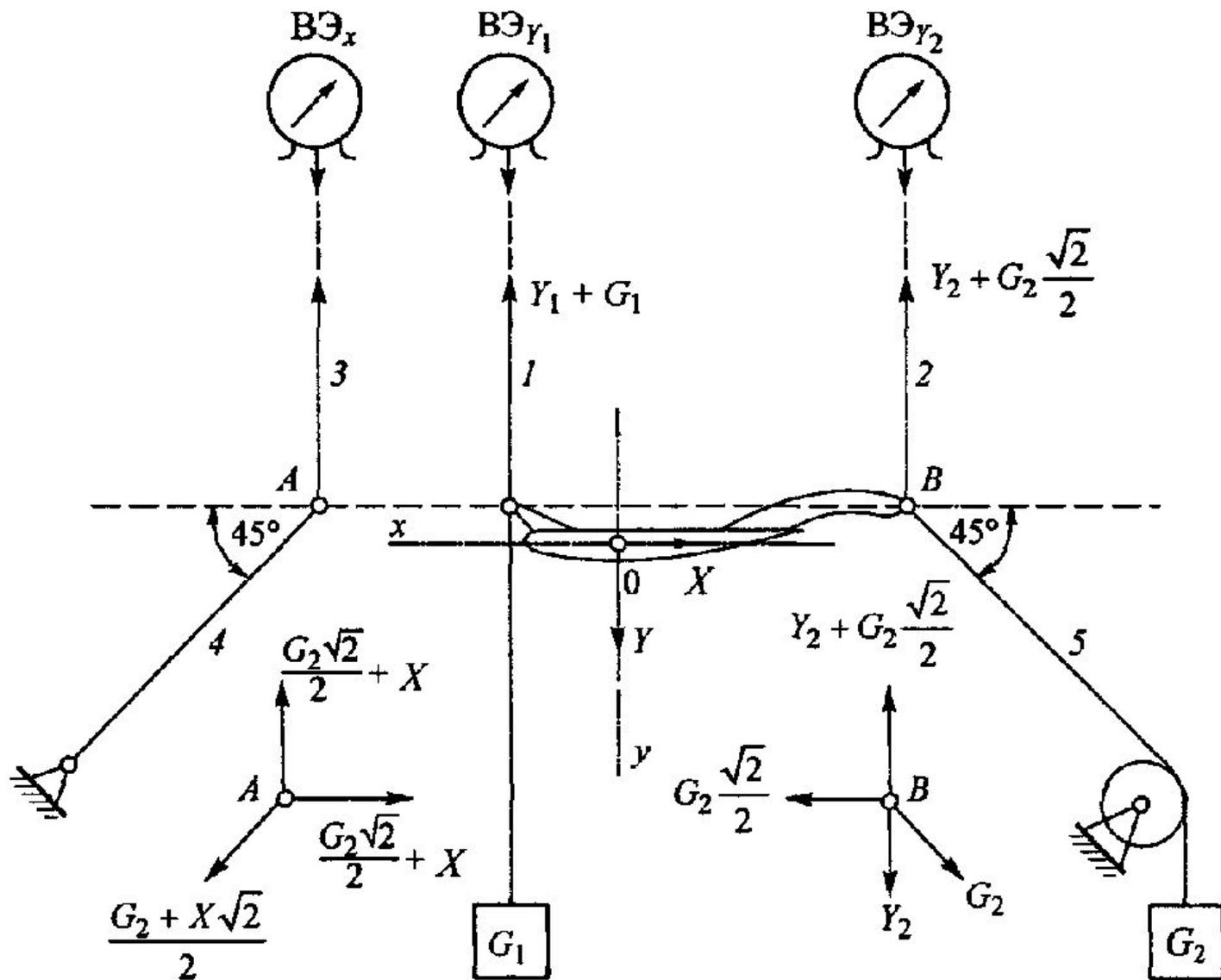


Рис 1 2. Простейшая система разложения сил при помощи проволочной подвески



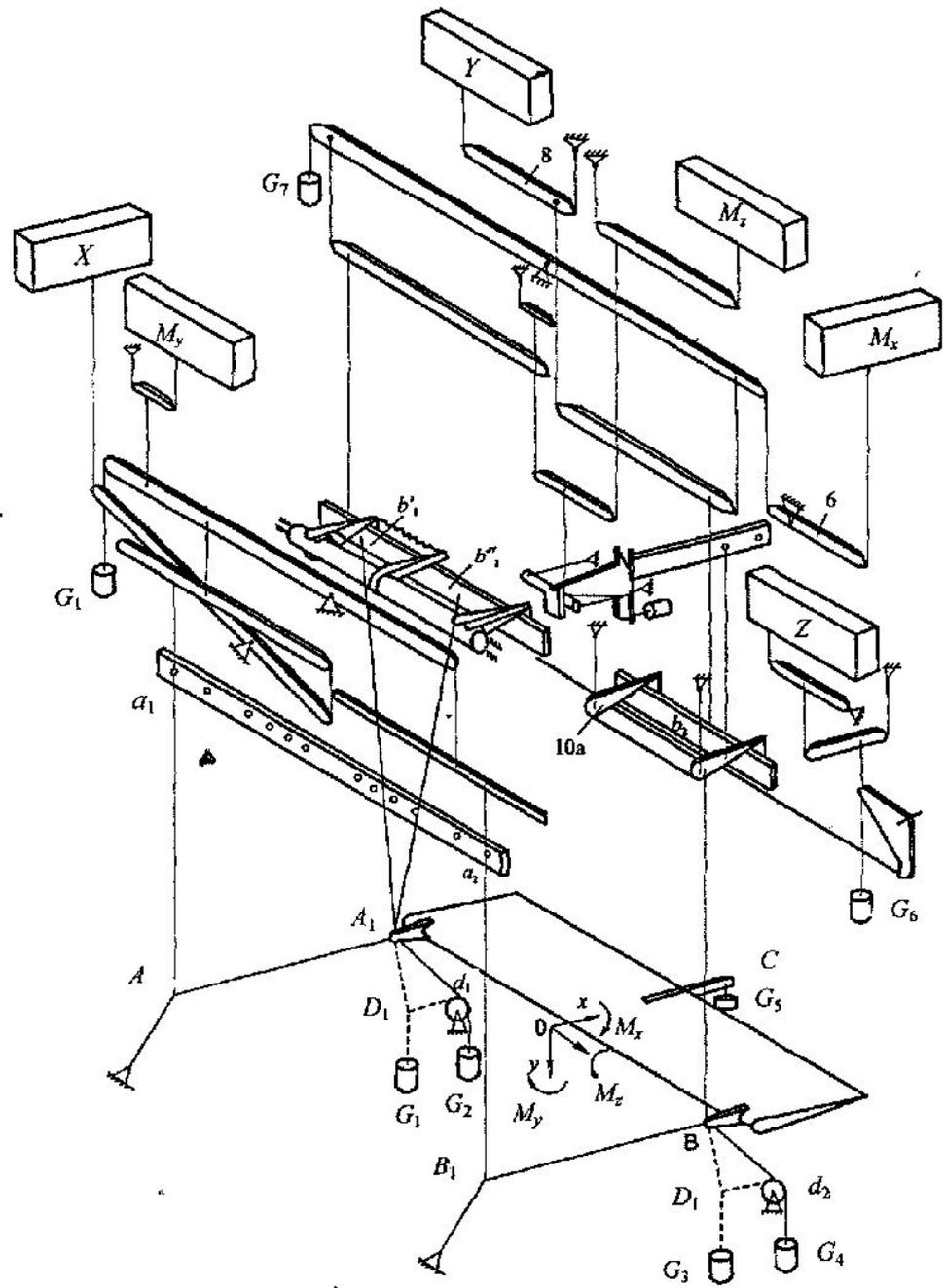


Рис 13. Схема шестикомпонентных аэродинамических весов АВМ-203

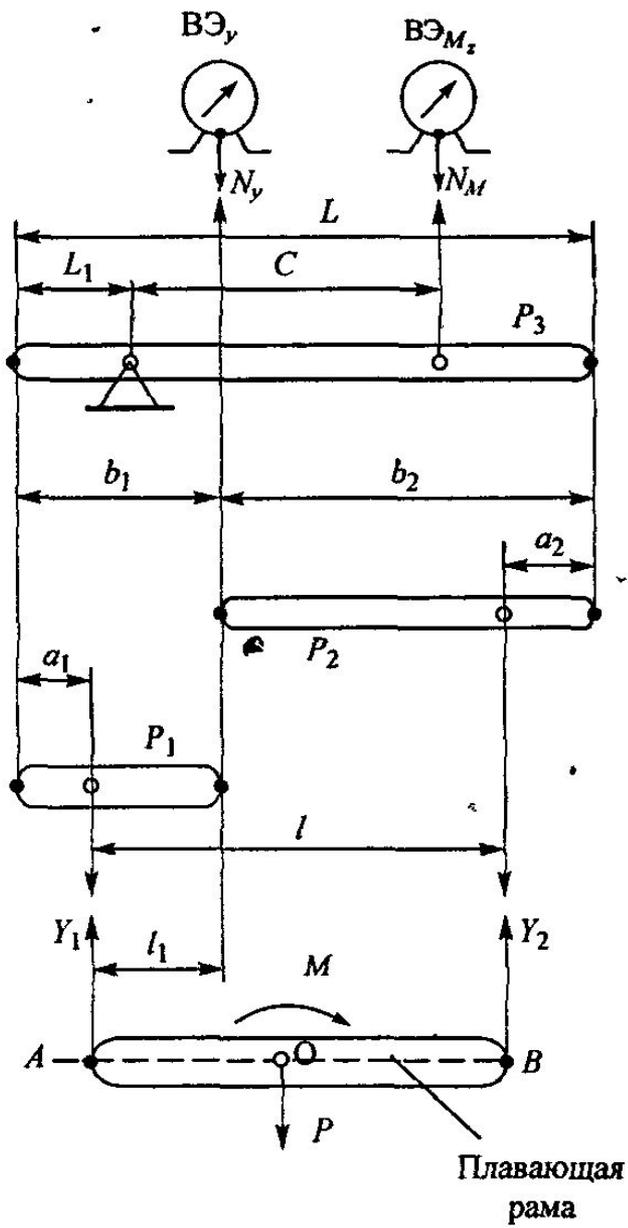


Рис. 1.5. Схема рычажной системы с двумя степенями свободы

Сверхзвуковая аэродинамическая труба Т-313 оснащена четырёх-компонентными весами, фото которых приведено на рис. 1.8. Они предназначены для измерения:

- силы лобового сопротивления – 0...150 кг;
- подъёмной силы – 0...500 кг;
- момента тангажа – 0...90 кгм;
- момента крена – 0...50 кгм.

Напомним, что измерения проводятся в весовой системе координат, которая параллельна поточным осям трубы.

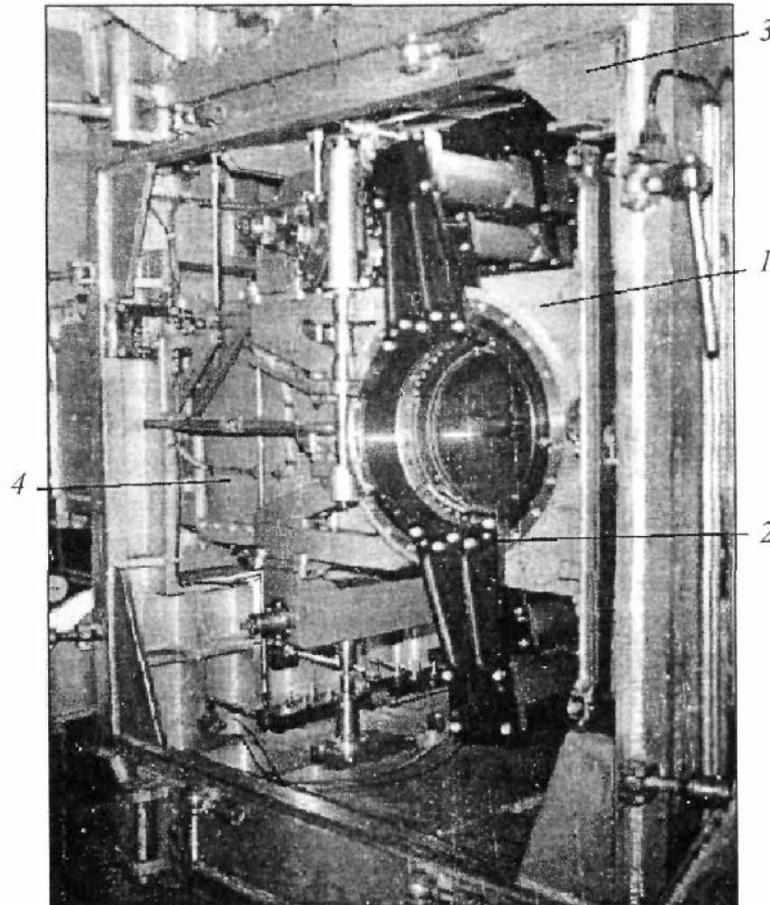


Рис. 1.8. Фото рабочей части Т-313

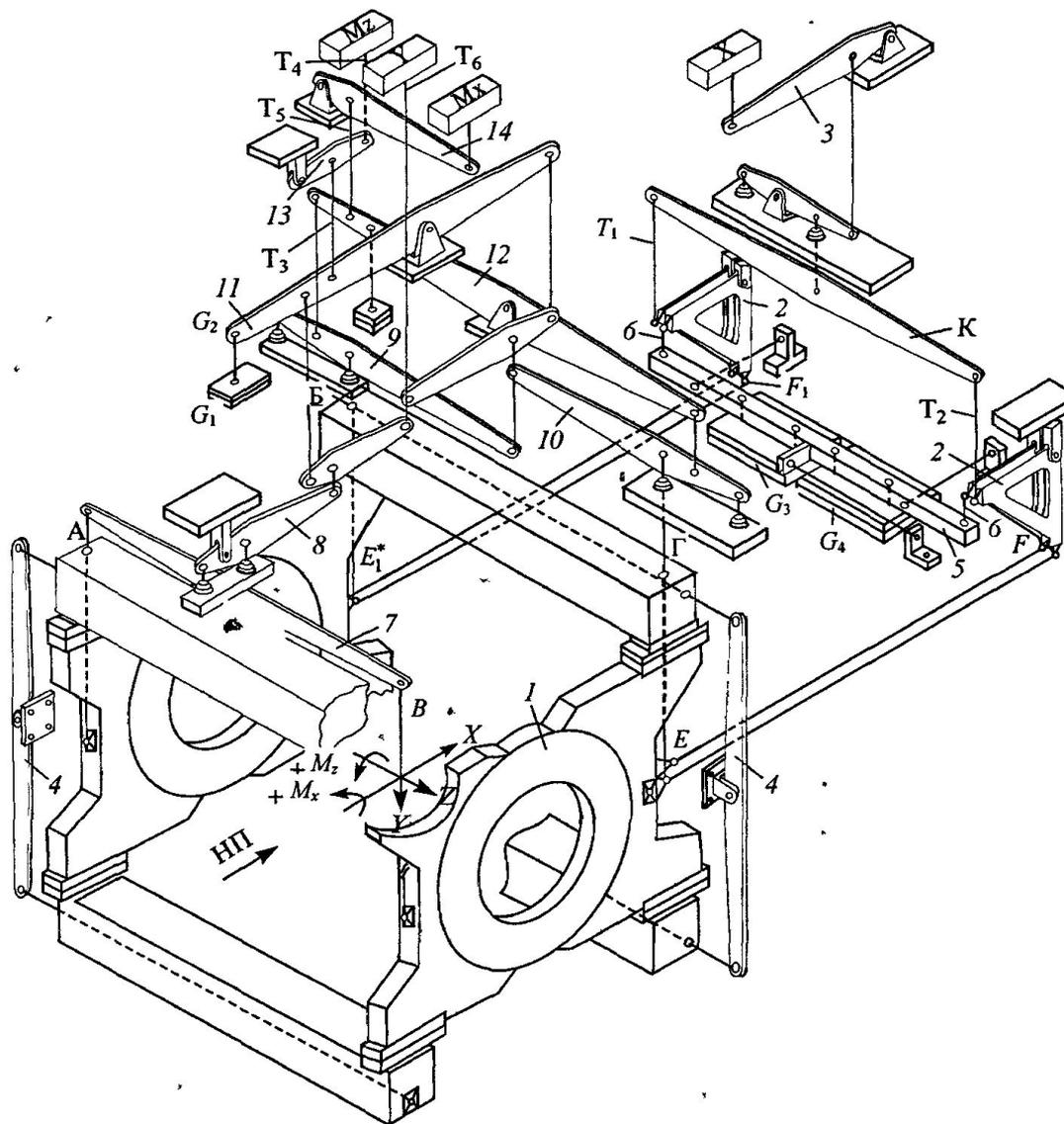
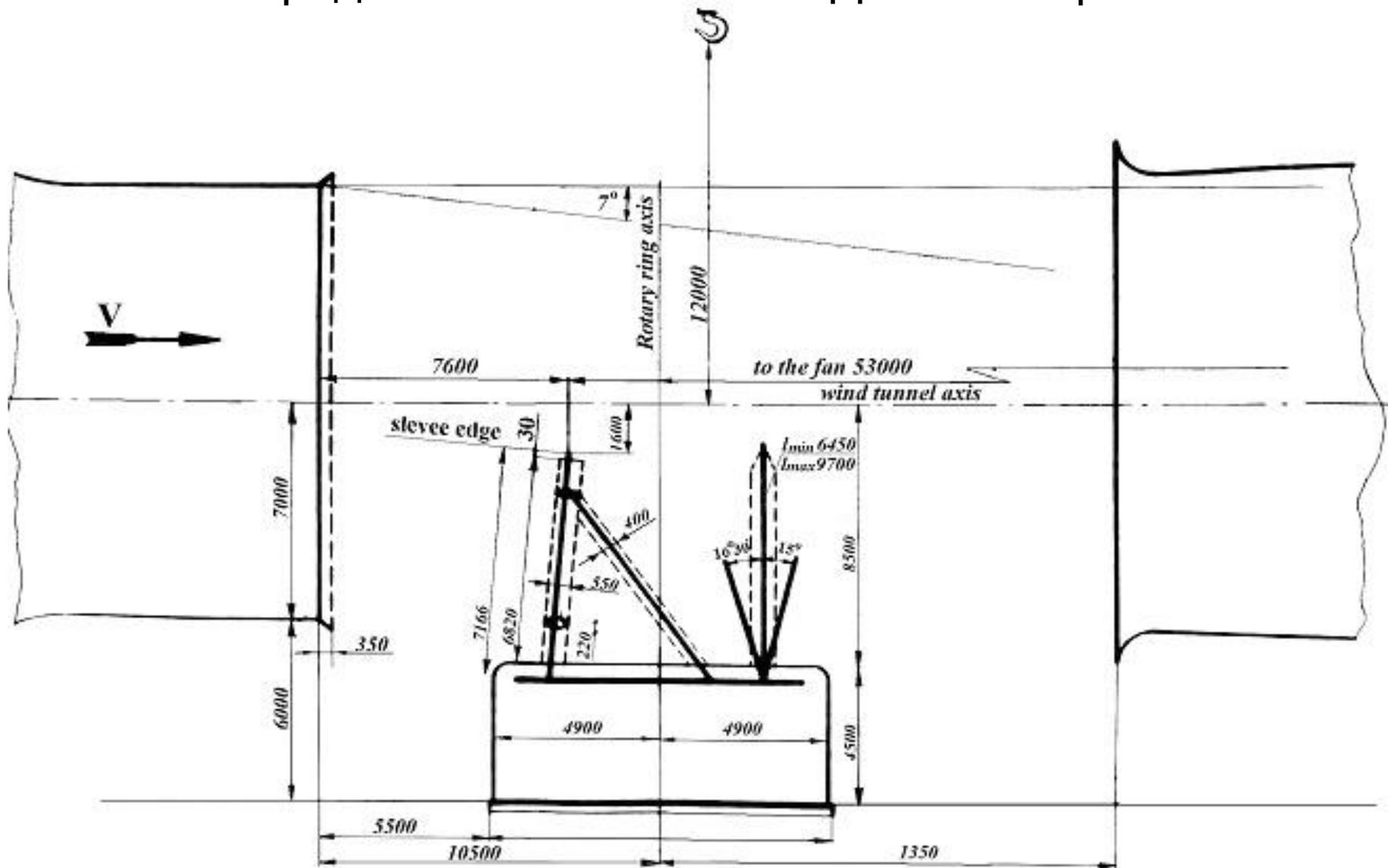
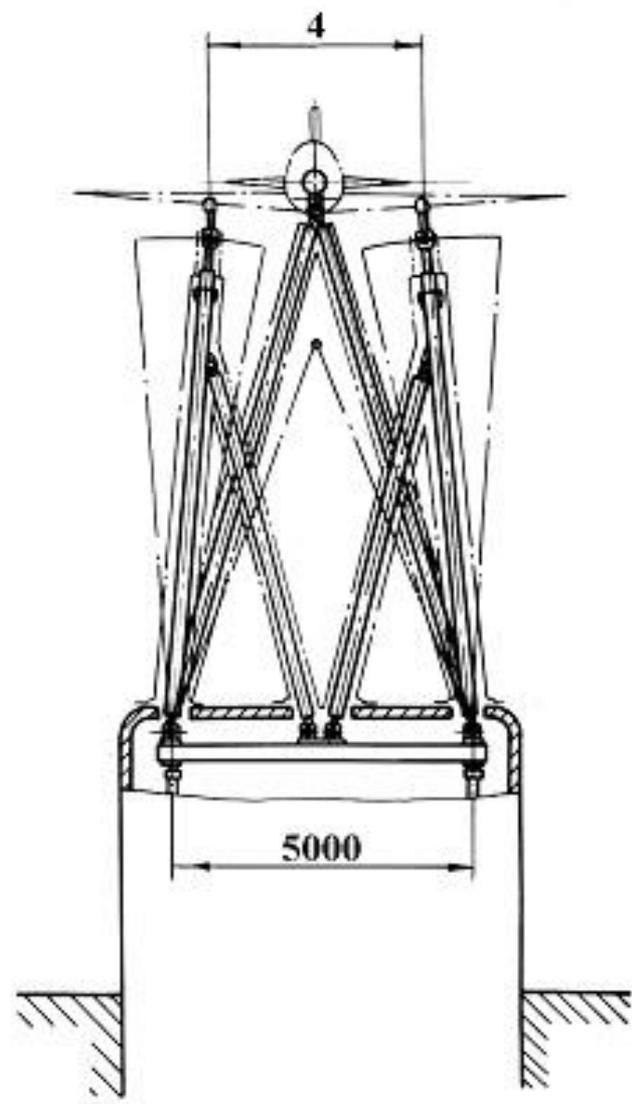
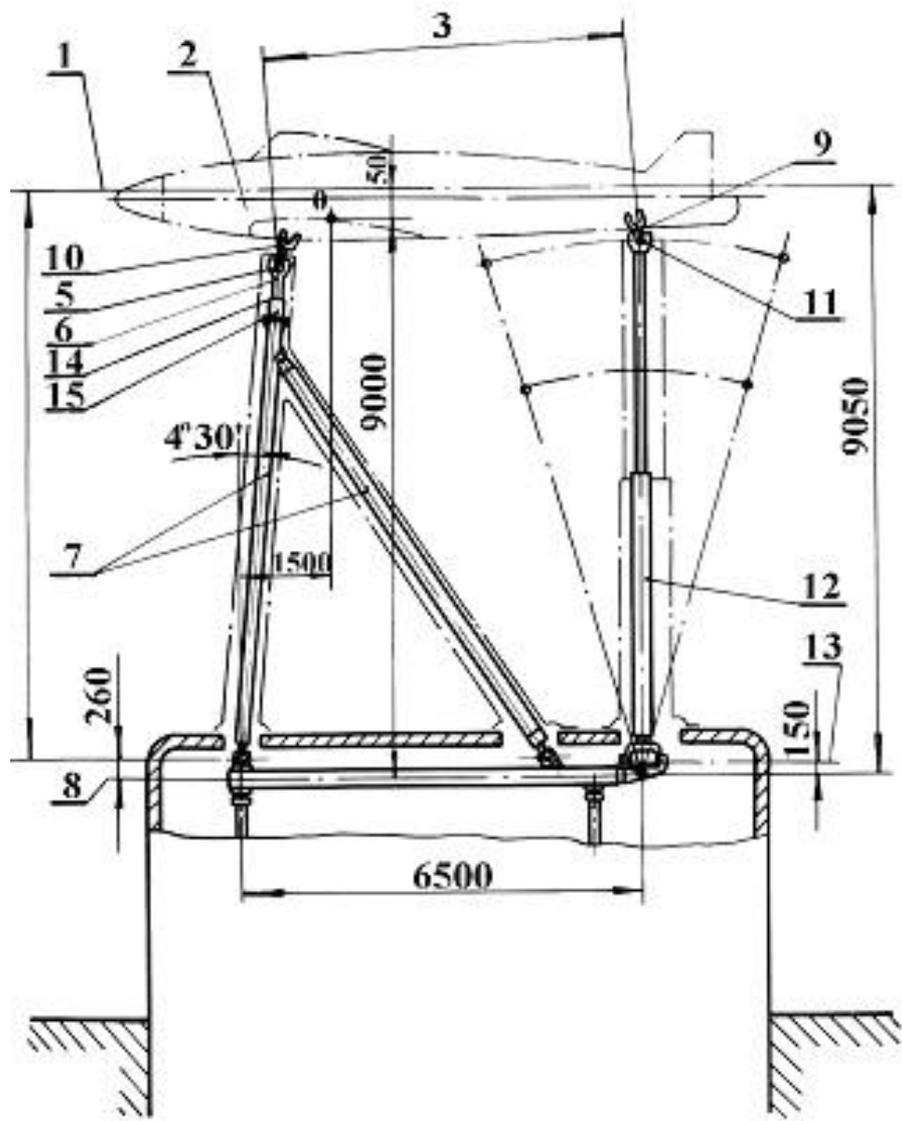


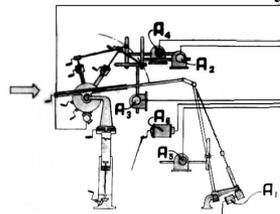
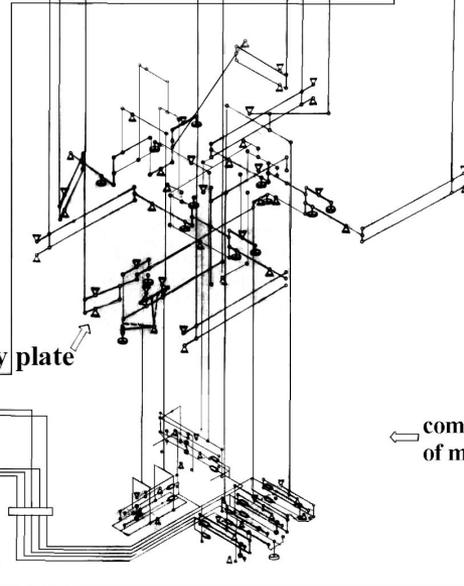
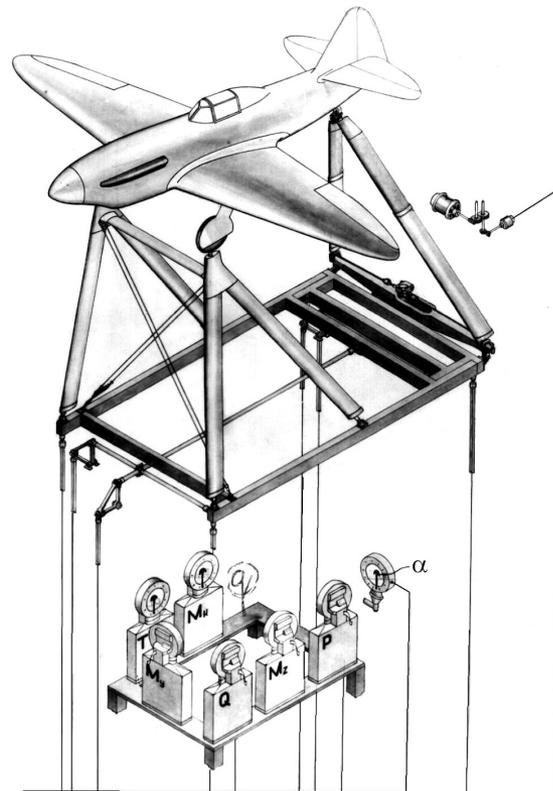
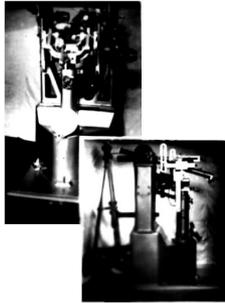
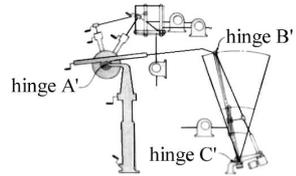
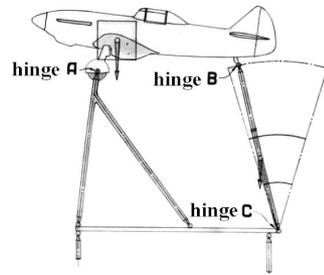
Рис. 1.9. Рычажная система АВ-313М:

1 – плавающая рама; 2 – угловые измерительные рычаги; 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 – рычаги; 4 – поперечные качалки

# Аэродинамические весы АДТ Т-101 ЦАГИ







compensators of moments

# Весовые элементы механических весов

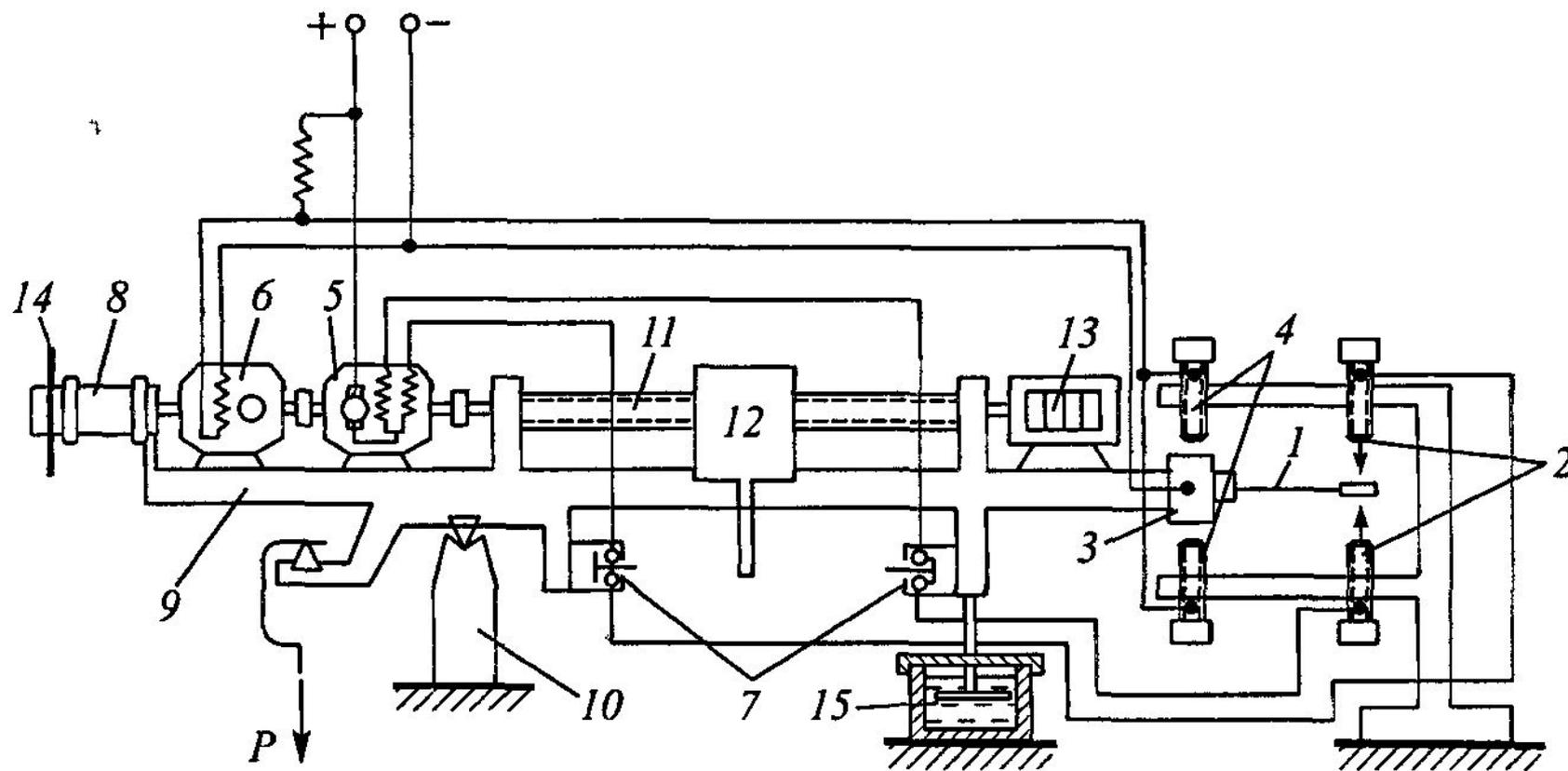


Рис 16. Схема автоматического рычажного ВЭ

Ходовой винт связан с реверсивным сервомотором 5. Для управления сервомотором служит контактный или индуктивный датчик, реагирующий на перемещение правого плеча коромысла. При увеличении нагрузки правый конец коромысла перемещается вверх, датчик включает сервомотор, и ходовой винт начинает перемещать рейтер 12 вправо, восстанавливая равновесие коромысла. В момент равновесия сигнал датчика становится равным нулю и сервомотор останавливается. Таким образом, датчик перемещений вместе с сервомотором образует замкнутую систему автоматического регулирования, в которой регулируемым параметром является угловое положение коромысла, а роль регулирующего органа выполняет ходовой винт с рейтером.

Контактный датчик с двухскоростной системой управления сервомотором (с помощью конечных выключателей 7) обеспечивает резкое уменьшение скорости вращения непосредственно перед достижением статического равновесия коромысла и мощное торможение сервомотора после его выключения при разрыве контактов. Для этого на одном валу с сервомотором 5 и сельсином 8 устанавливается электромагнитный тормоз 6, состоящий из железного ротора, вращающегося в магнитном поле статора, возбуждаемого постоянным током. При вращении ротора в нём индуцируются токи Фуко, и на его валу возникает момент, пропорциональный скорости вращения.

Недостатком рейтерного весового элемента с контактными датчиком перемещения коромысла является склонность к автоколебаниям всей системы автоматического уравнивания при увеличении чувствительности коромысла. В результате автоколебаний положение груза на коромысле колеблется по отношению к положению равновесия. Для уменьшения колебаний коромысла служит демпфер 15, который должен быть тщательно настроен. Слишком большое демпфирование приводит к запаздыванию разрыва точных контактов, что вызывает перебрасывание груза за положение равновесия и приводит к автоколебаниям. При очень слабом демпфировании после разрыва точных контактов демпфер не в состоянии поглотить кинетическую энергию коромысла и автоколебания могут иметь место даже при малом инерционном выбеге груза. Поэтому демпфирование должно подбираться так, чтобы после разрыва точных контактов кинетическая энергия коромысла была поглощена до того, как замкнется противоположный контакт.

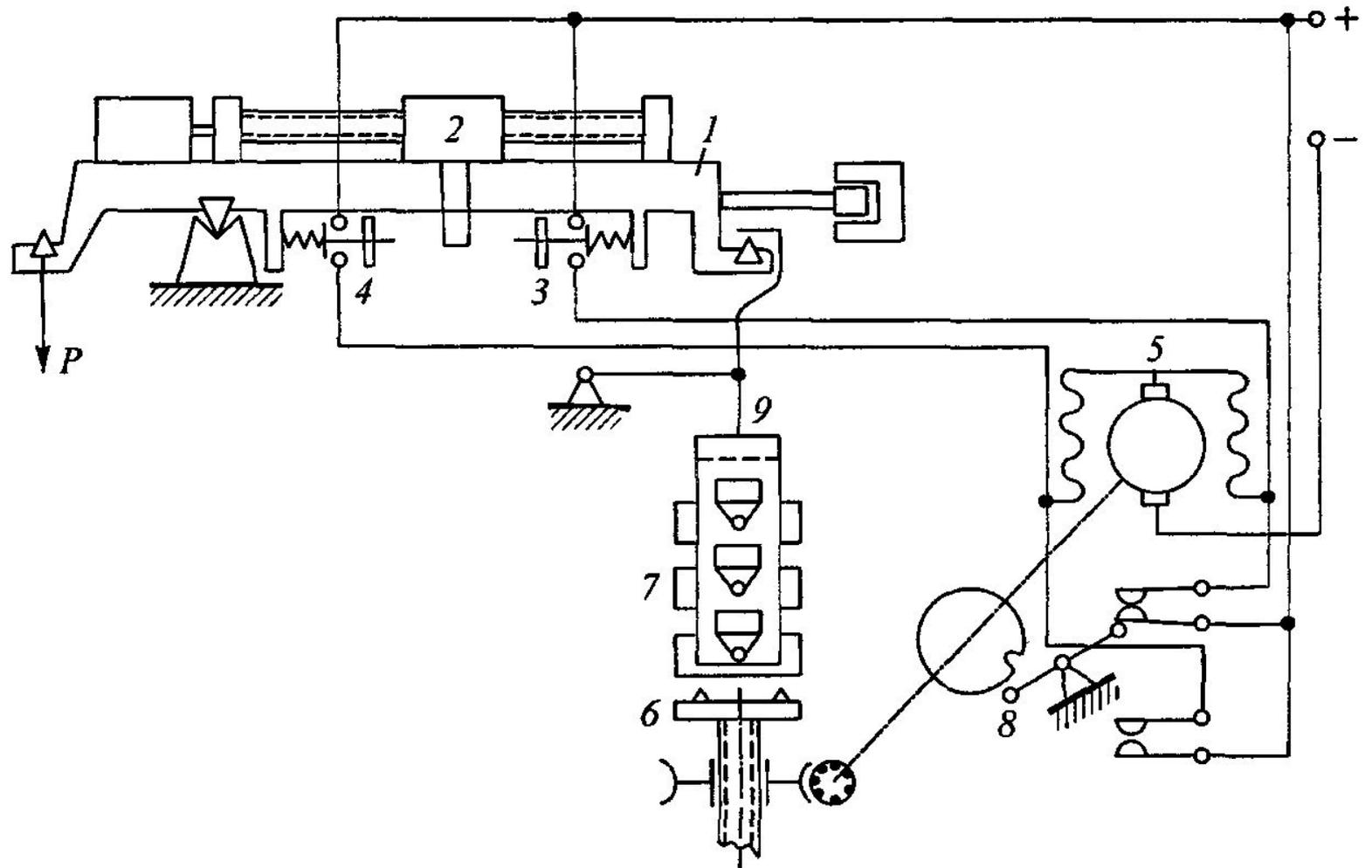


Рис. 1.7. Схема ВЭ с автоматической накладкой гирь

## 1.4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ВЕСЫ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

Тензометрические весы обладают рядом преимуществ, прежде всего, малыми габаритами, позволяющими размещать их внутри модели, и существенно большим быстродействием. Наряду с этим удобство и простота этих весов в последние десятилетия привлекли большое внимание экспериментаторов, что привело к чрезвычайно широкому их распространению, особенно в качестве внутримодельных весов для измерения сил и моментов, действующих на модели в аэродинамических трубах.

Тензометрические аэродинамические весы [2] представляют собой особую упругую систему, деформации отдельных элементов которой пропорциональны компонентам или алгебраическим суммам компонент полной аэродинамической силы и момента, действующих на модель. Эти деформации измеряются при помощи электрических преобразователей деформации в электрическую величину.

В аэродинамических весах исключительное применение нашли тензометры сопротивления, основанные на преобразовании деформаций упругого элемента в изменение электрического сопротивления, которое измеряется прибором, соединенным с соответствующей измерительной схемой.

## 1.4.1. ТЕНЗОДАТЧИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

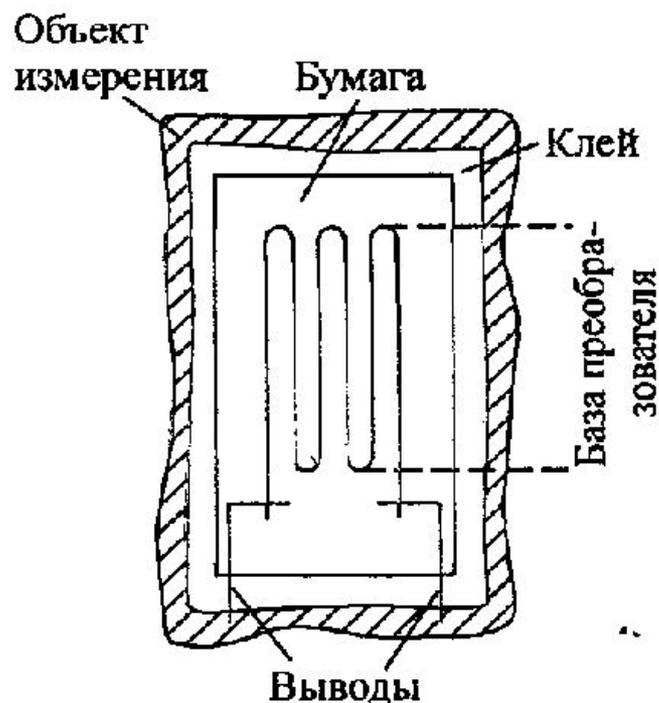


Рис. 1.10. Проволочная решетка

В настоящее время широко используются проволочные, фольговые или полупроводниковые тензодатчики. В аэродинамических весах чаще всего применяются проволочные преобразователи [4].

Тензометр (проволочная решетка) представляет собой (рис. 1.10) обычно проволоку очень малого диаметра (0,025...0,05) мм из сплава с высоким электрическим сопротивлением, приклеенную между двумя слоями бумаги или пленки. Если такой тензодатчик приклеить к поверхности какого-либо упругого элемента, то при деформации последнего датчик будет деформироваться вместе с указанной поверхностью.

Преимуществами тензодатчиков, обеспечивающими их широкое применение при измерениях аэродинамических сил, являются:

- 1) малые размеры и вес;
- 2) возможность измерения очень малых относительных деформаций упругих элементов (менее  $10^{-3}$ ), что позволяет использовать упругие элементы с большей жесткостью и, следовательно, с высокой собственной частотой колебаний;
- 3) малая инерционность, что позволяет измерять не только статические, но и динамические нагрузки;
- 4) возможность дистанционных измерений.

Основной характеристикой тензометров сопротивления является коэффициент тензочувствительности  $S$ , определенный как частное от деления относительного изменения электрического сопротивления проволоки на величину относительной линейной деформации

$$S = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l},$$

где  $R$  – сопротивление,  $l$  – длина проволоки.

Таким образом, если измерить  $\Delta R / R$ , то, зная коэффициент тензочувствительности, можно найти относительное удлинение проволоки, а следовательно, и материала упругого элемента, к которому приклеен тензодатчик

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{S} \frac{\Delta R}{R}.$$

Сопротивление тензодатчика, установленного на упругом элементе, при деформациях последнего изменяется на очень малую величину. Так при относительной деформации 0,1 % ( $\sigma = 2000 \text{ кг/см}^2$ ) и  $R = 100 \text{ Ом}$  изменение сопротивления соответствует  $\Delta R = R S \varepsilon = 100 \cdot 2 \cdot 0,001 = 0,2 \text{ Ом}$ . Если потребовать, чтобы точность отсчета соответствовала 0,1 % от  $\sigma_{\text{max}}$  (т.е.  $2,0 \text{ кг/см}^2$ ), то сопротивление необходимо измерять с точностью до 0,0002 Ом, что соответствует относительной точности  $2 \cdot 10^{-6}$ .

Такая точность может быть достигнута только при компенсационном методе измерения, например, методом моста Уитстона.

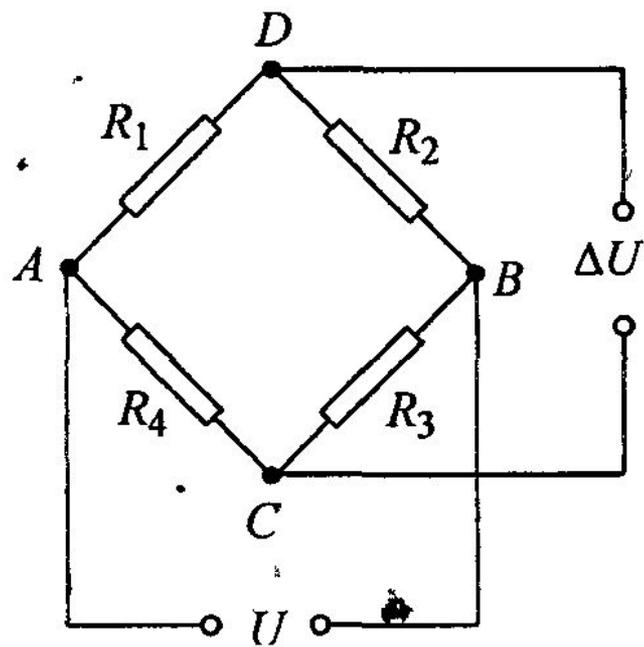


Рис. 1.11. Измерительный мост Уитстона

Простейший измерительный мост, который состоит из 4 сопротивлений (плеч)  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , и  $R_4$ , показан на рис. 1.11. К точкам  $AB$  подводится напряжение  $U_0$ , а с точками  $DC$  соединяется измерительный прибор. В аэродинамических весах включают чаще всего все четыре плеча моста, что позволяет повысить чувствительность и, используя свойства моста, компенсировать влияние различных источников погрешностей.

Если отношения сопротивлений смежных плеч моста равны  $R_1/R_2 = R_3/R_4$ , то разность потенциалов на измерительной диагонали моста равна нулю. Такой мост называется уравновешенным. При изменении сопротивления одного из плеч первоначально уравновешенного моста между точками  $C$  и  $D$  измерительной диагонали появляется разность потенциалов  $\Delta U$ , называемая напряжением разбаланса моста. Эта величина при малых относительных изменениях сопротивления плеч линейно зависит от суммы или разности этих изменений.

**Связь между напряжением разбаланса и деформациями датчиков.** В измерительных схемах многокомпонентных аэродинамических весов применяют мосты, состоящие из 2, 4, 8, а иногда из 12 рабочих датчиков. Мосты с большим числом датчиков, помимо повышения чувствительности, позволяют осуществлять независимые измерения отдельных компонент.

Существенно, чтобы выходной сигнал мостовой схемы был линейно связан с измеряемыми величинами. Если нагрузкой измерительной диагонали моста является высокое входное сопротивление усилителя, то в случае равноплечевого моста изменение сопротивления плеч на величины  $\Delta R_1 \dots \Delta R_4$  вызывает на вершинах измерительной диагонали напряжение разбаланса, которое при малых  $\Delta R$  можно принять равным

$$\Delta U = \frac{U_0}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right).$$

Если все датчики имеют одинаковый коэффициент  $S$ , то напряжение разбаланса выражается через относительные деформации

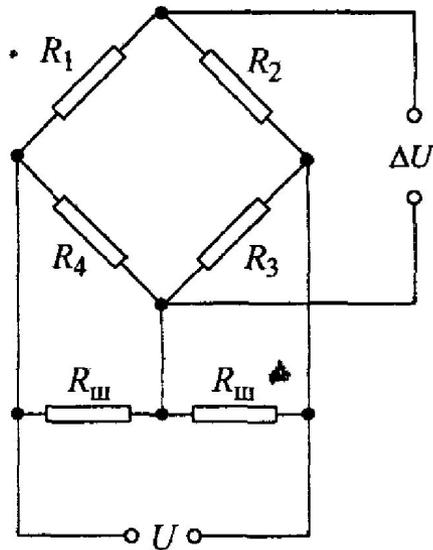
$$\Delta U = \frac{U_0 S}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4).$$

Полное напряжение разбаланса можно рассматривать как сумму напряжений разбаланса двух отдельных полумостов, разделённых диагональю питания.

Если датчики нижнего полумоста шунтировать одинаковыми сопротивлениями  $R_{ш}$ , то

$$\Delta U = \frac{U_0 S}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + c(\varepsilon_3 + \varepsilon_4)],$$

где  $c = \frac{R_{ш}}{(R_{ш} + R)}$  — коэффициент ослабления сигнала нижнего полумоста (рис. 1.12).



Подобного рода методами ослабления сигнала одного из полумостов в тензометрических весах пользуются для устранения взаимных влияний компонент.

Рис 1.12 Схема с шунтированием датчиков полумоста

**Кинематический упругий элемент** служит для обеспечения возможности поступательного или вращательного перемещения какого-либо жесткого элемента конструкции весов.

**Измерительный упругий элемент** служит для противодействия этому перемещению. Сила реакции между первым и вторым упругими элементами пропорциональна измеряемой компоненте и тем ближе к ней, чем больше отношение жесткости измерительного к кинематическому упругих элементов. Тензодатчики, установленные на измерительном упругом элементе, позволяют измерить эту реакцию, а предварительной тарировкой весов она сопоставляется с измеряемой компонентой.

Случай непосредственного измерения силы и момента с помощью консольной державки приведён на рис. 1.13. Упругий элемент состоит из связанных между собой жесткими элементами двух параллельных пластинок 1 (упругий параллелограмм) и служит для кинематической изоляции силы  $P$ . Упругий шарнир 2 служит для «изоляции» момента  $M$ , 3–4 – упругие измерительные элементы соответственно для измерения  $P$  и  $M$ .

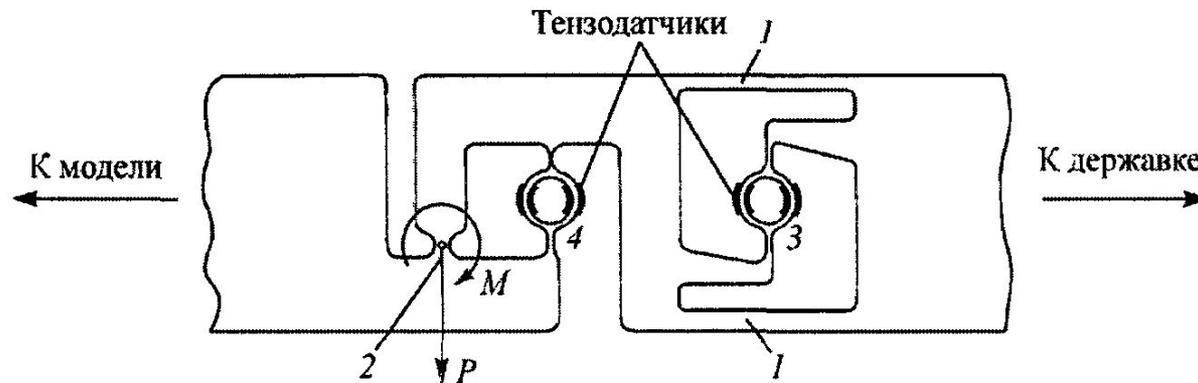


Рис. 1.13 Консольная тензодержавка

Измеряя деформации в двух различных сечениях стержня, можно получить два независимых уравнения, решение которых дает неизвестные силу и пару сил. На этом принципе основаны двухкомпонентные «стержневые» весы, схема которых приведена на рис. 1.14.

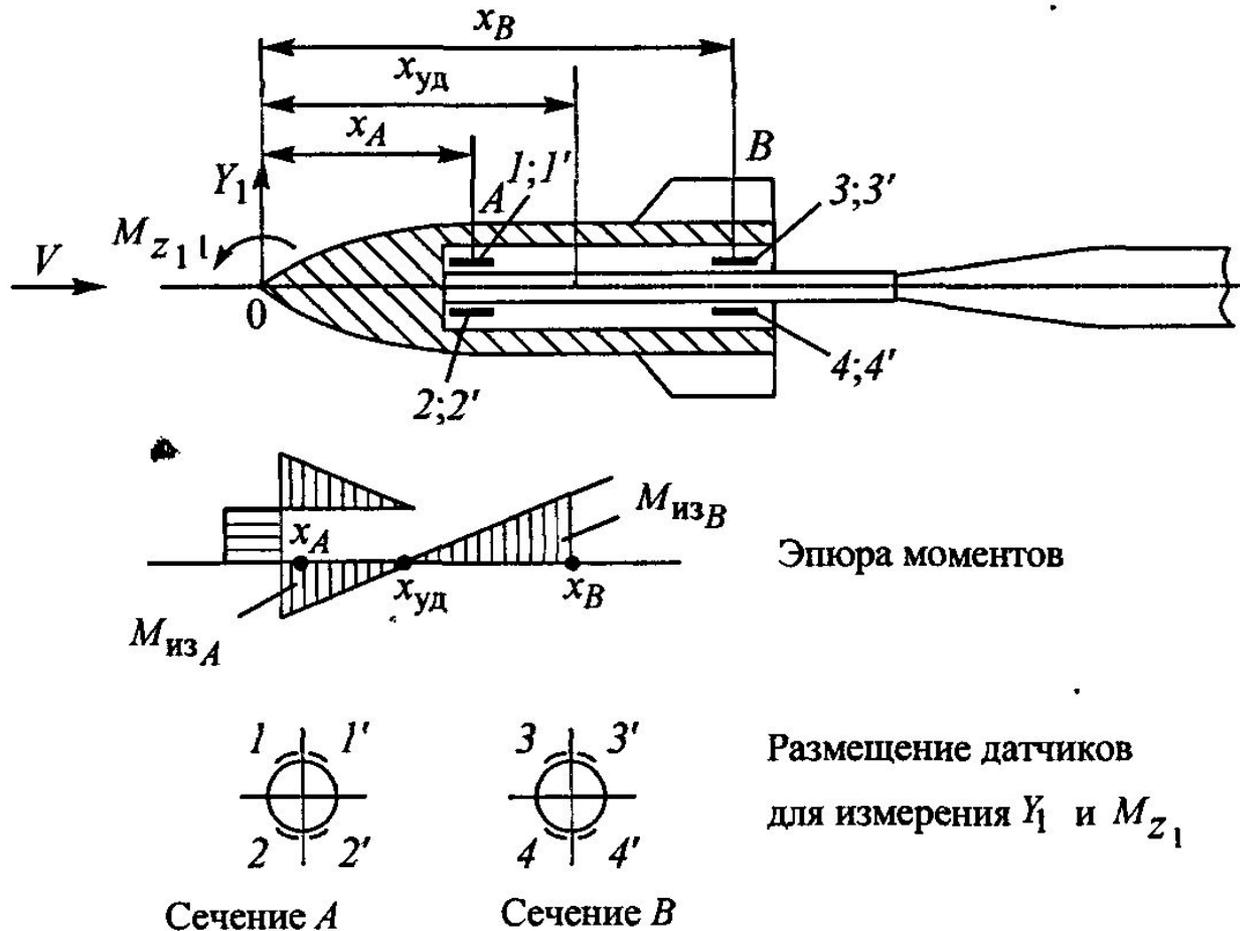


Рис. 1.14. Схема двухкомпонентных «стержневых» весов

Аналогичным образом можно измерять  $Z$  и  $M_y$ , если датчики располагать в плоскости параллельной  $XOZ$ . Недостатком стержневых тензочувствителей является сравнительно малая чувствительность, так как во избежание больших перемещений модели, вызываемых изгибом стержня, ограничивают величины сигнальных деформаций. Для увеличения полезного сигнала иногда прибегают к местным ослаблениям сечения стержня, как, например, показано на рис. 1.17.

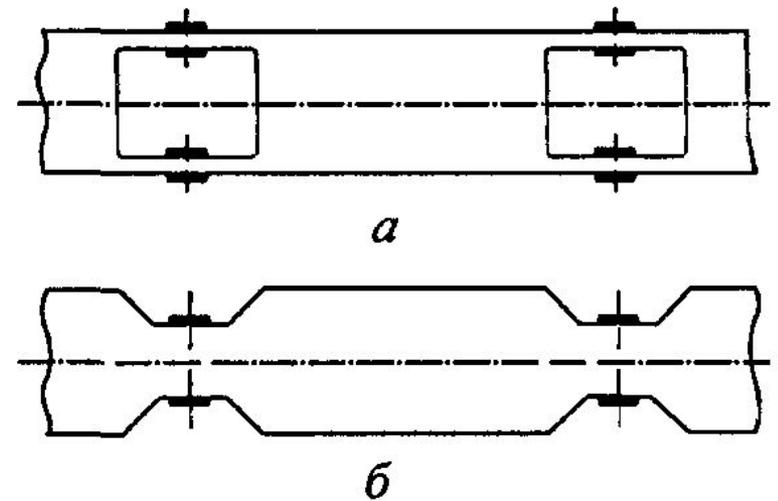


Рис. 1.17. Схемы ослабления сечения стержня

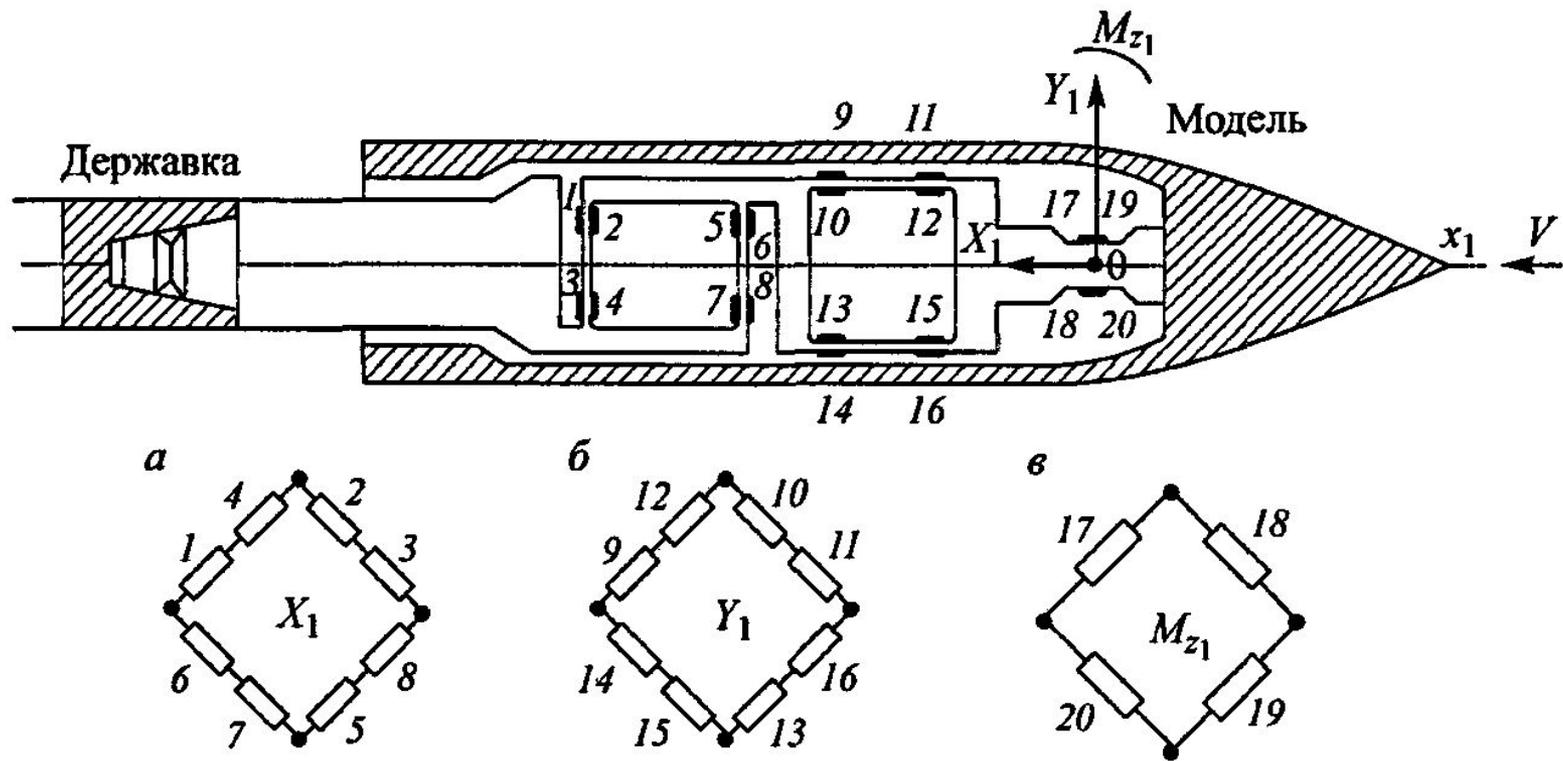


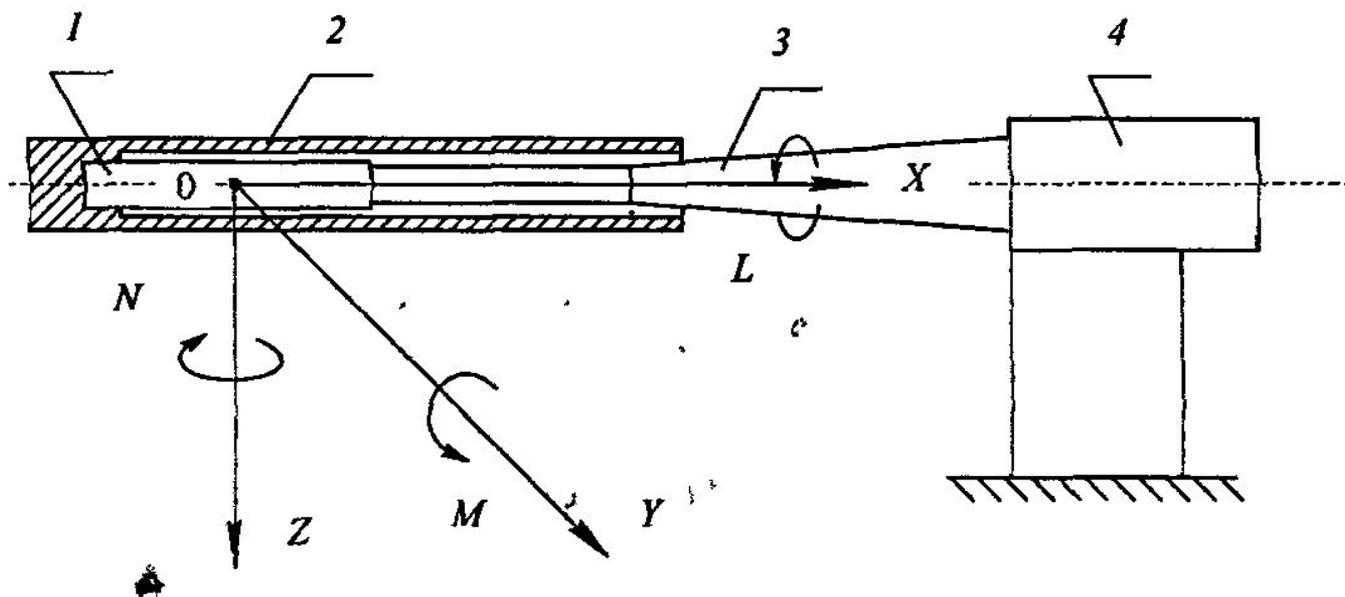
Рис. 1.20. Схема трехкомпонентных весов на упругих параллелограммах



### **1.4.3. ГРАДУИРОВКА ВНУТРИМОДЕЛЬНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕСОВ**

Для того чтобы определить соответствующую силу или момент по измеренному сигналу тензометрического моста, необходимо знать коэффициенты преобразования, которые находятся в результате градуировок аэродинамических весов. Для этих целей используют специальные градуировочные стенды (приспособления), на которых устанавливаются весы. Градуировочное приспособление устанавливается вместо модели или на модели так, чтобы направления нагрузок точно совпадали с осями весов. При этом градуировочные приспособления оснащаются поворотным механизмом, позволяющим поворачивать весы вокруг оси на  $360^\circ$ , а также отклонять их в вертикальной плоскости на  $\pm 5^\circ$ . Благодаря такому механизму поворота к весам можно прилагать положительные или отрицательные нагрузки в любой плоскости, т. е. создавать положительную или отрицательную нормальную и поперечную силы, а также любую комбинацию этих сил при углах крена, отличных от  $0, 90, 180$  и  $270^\circ$ . Механизм отклонения весов удерживает их всё время в горизонтальном положении, что даёт возможность измерять деформацию весов и державки.

Статическая градуировка тензометрических весов заключается в нагружении их эталонными нагрузками в направлениях координатных осей и известными моментами относительно этих осей и измерении соответствующих откликов тензомостов. Градуировочное приспособление [47], пример которого показан на рис. 1.22, установлено вместо модели на систему «тензовесы + державка модели». Такое приспособление позволяет создать известные нагрузки по компонентам  $X$ ,  $Y$ ,  $M_x$  и  $M_z$ , а при повороте на  $90^\circ$  – по недостающим компонентам  $Z$  и  $M_y$ . Как видно из представленной схемы нагружений, при градуировках весы здесь нагружаются моментами произвольного знака и силами (в трубной системе координат) – только положительными. Обычно выполняются трёхкратные циклы нагружения и разгружения по каждой компоненте весов.



**Рис. 1.22.** Пример градуировочного приспособления:

*1* – тензovesы, *2* – градуировочное приспособление, *3* – державка,  
*4* – стойка, точка «O» – моментная ось весов

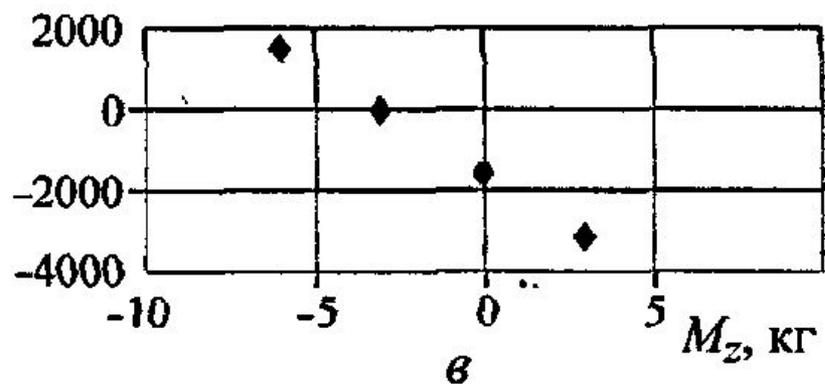
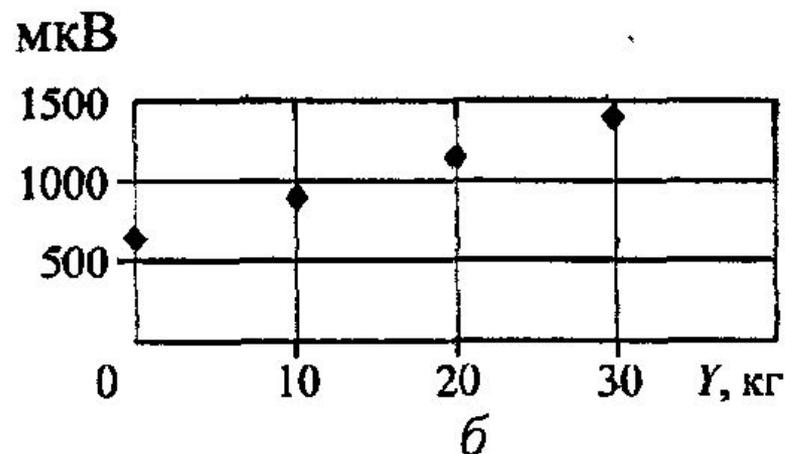
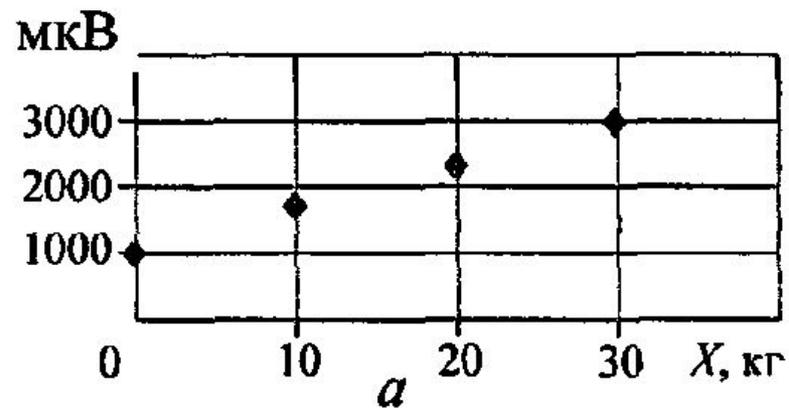


Рис. 1.23. Зависимость сигналов от величин нагрузок:

$a - X$ ,  $б - Y$  и  $в - M_z$

Пример расчётной формулы и матрицы коэффициентов взаимовлияния шестикомпонентных весов (табл. 1) представлен ниже.

$$U_X = K_x^x + K_x^y + K_x^z + K_x^{m_x} + K_x^{m_y} + K_x^{m_z}.$$

Т а б л и ц а 1

$K_x^x$	$K_x^y$	$K_x^z$	$K_x^{m_x}$	$K_x^{m_y}$	$K_x^{m_z}$
$K_y^x$	$K_y^y$	$K_y^z$	$K_y^{m_x}$	$K_y^{m_y}$	$K_y^{m_z}$
$K_z^x$	$K_z^y$	$K_z^z$	$K_z^{m_x}$	$K_z^{m_y}$	$K_z^{m_z}$
$K_{m_x}^x$	$K_{m_x}^y$	$K_{m_x}^z$	$K_{m_x}^{m_x}$	$K_{m_x}^{m_y}$	$K_{m_x}^{m_z}$
$K_{m_y}^x$	$K_{m_y}^y$	$K_{m_y}^z$	$K_{m_y}^{m_x}$	$K_{m_y}^{m_y}$	$K_{m_y}^{m_z}$
$K_{m_z}^x$	$K_{m_z}^y$	$K_{m_z}^z$	$K_{m_z}^{m_x}$	$K_{m_z}^{m_y}$	$K_{m_z}^{m_z}$

Здесь  $K_x^x$ ,  $K_y^y$ ,  $K_z^z$ ,  $K_x^{m_x}$ ,  $K_y^{m_y}$ ,  $K_z^{m_z}$  – градуировочные коэффициенты каждой из компонент, а  $K_y^x$ ,  $K_x^y$ ,  $K_z^{m_z}$ , ..., – коэффициенты, учитывающие взаимовлияния компонент. Подстрочный индекс соответствует компоненте, влияющей на компоненту, обозначенную надстрочным индексом.

## 1.5. КОМБИНИРОВАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В настоящее время в большом числе аэродинамических лабораторий дозвуковые и сверхзвуковые трубы оснащены механическими весами. Поэтому для решения ряда задач удобно и целесообразно использовать то или иное сочетание весов механического и тензометрического типа.

- Во-первых, это случаи, когда аэродинамические трубы оснащены штатными механическими весами для измерения  $n$  компонент меньше шести. Тогда недостающие компоненты могут измеряться внутримодельными тензовесами.

- Во-вторых, в тех случаях, когда решаются задачи аэродинамической интерференции между отдельными элементами летательных аппаратов.

- В-третьих, при исследованиях аэрогазодинамики разделяющихся летательных аппаратов.

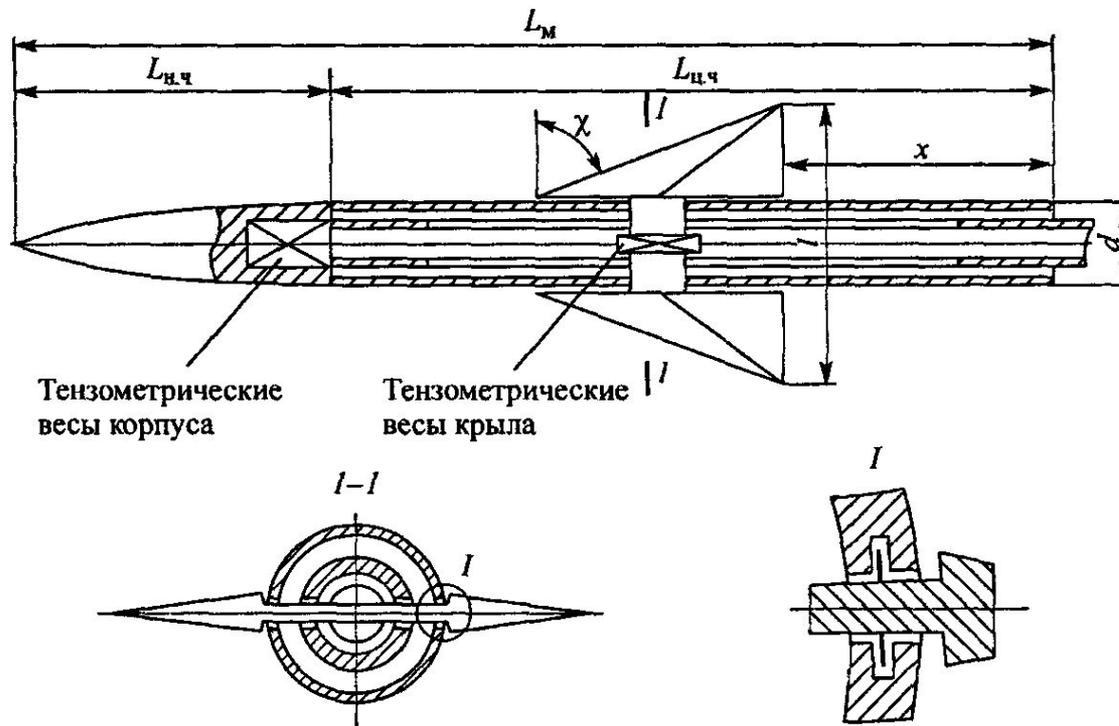
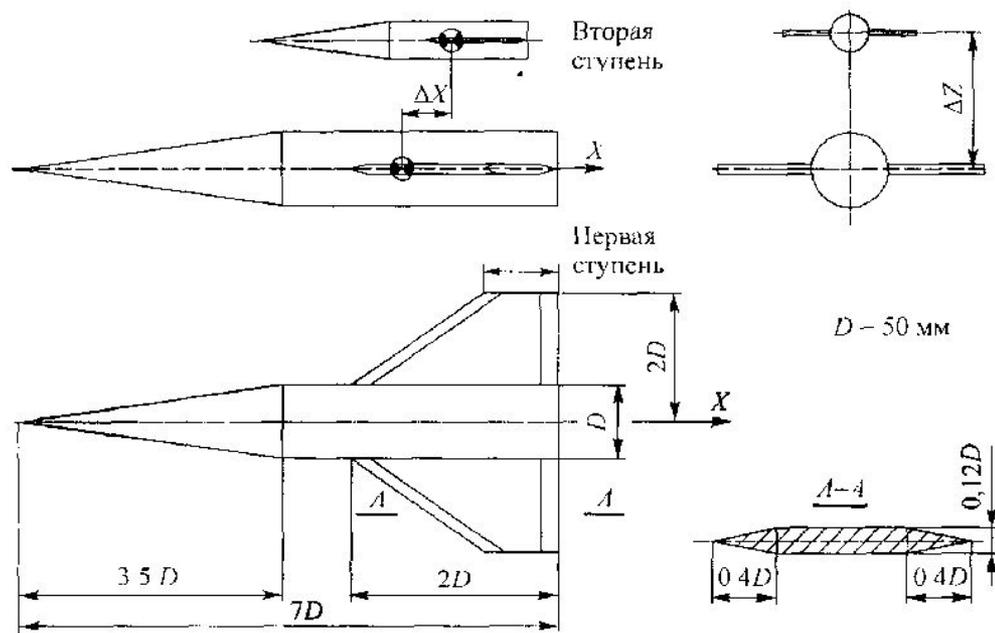


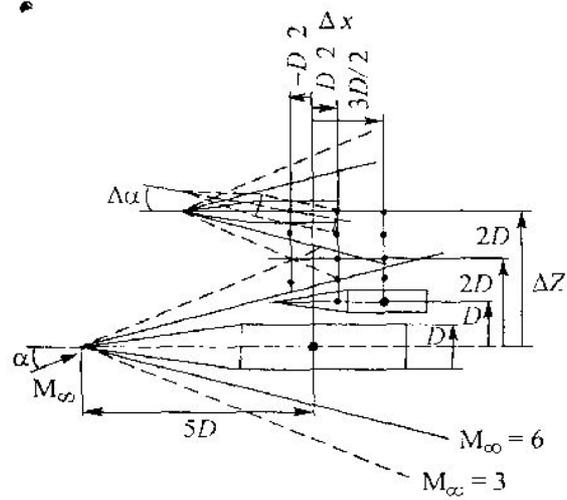
Рис. 1.26 Модель для изучения интерференции крыла с корпусом

Если в качестве параметра, характеризующего положение крыла на корпусе, выбрать  $\bar{x} = \frac{2\lambda_{\text{корм}}}{2\lambda_{\text{ц.ч}} - \frac{1-S}{S} \text{tg}\chi}$ , где  $S = \frac{d}{l}$  характеризует

относительную площадь крыла, то удлинение соответственно кормовой и цилиндрической части определяется при  $\bar{x} = 0$  – задняя кромка крыла совпадает с донным срезом корпуса, а при  $\bar{x} = 1$  – начало бортовой хорды совпадает с сечением перехода носовой части в цилиндрическую.



a



б

Рис 1 28 Схематизированная модель двухступенчатой системы для изучения процесса разделения

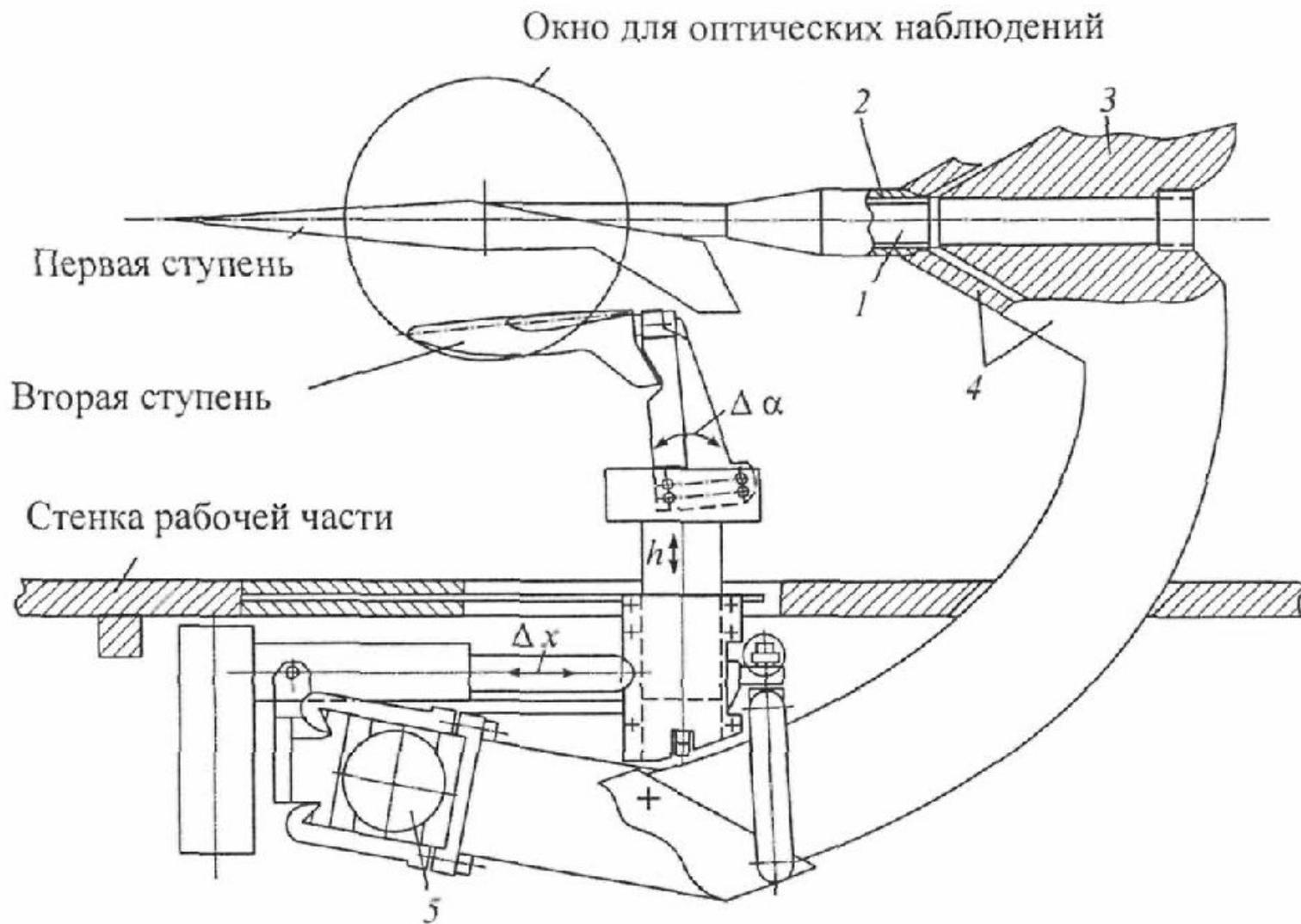
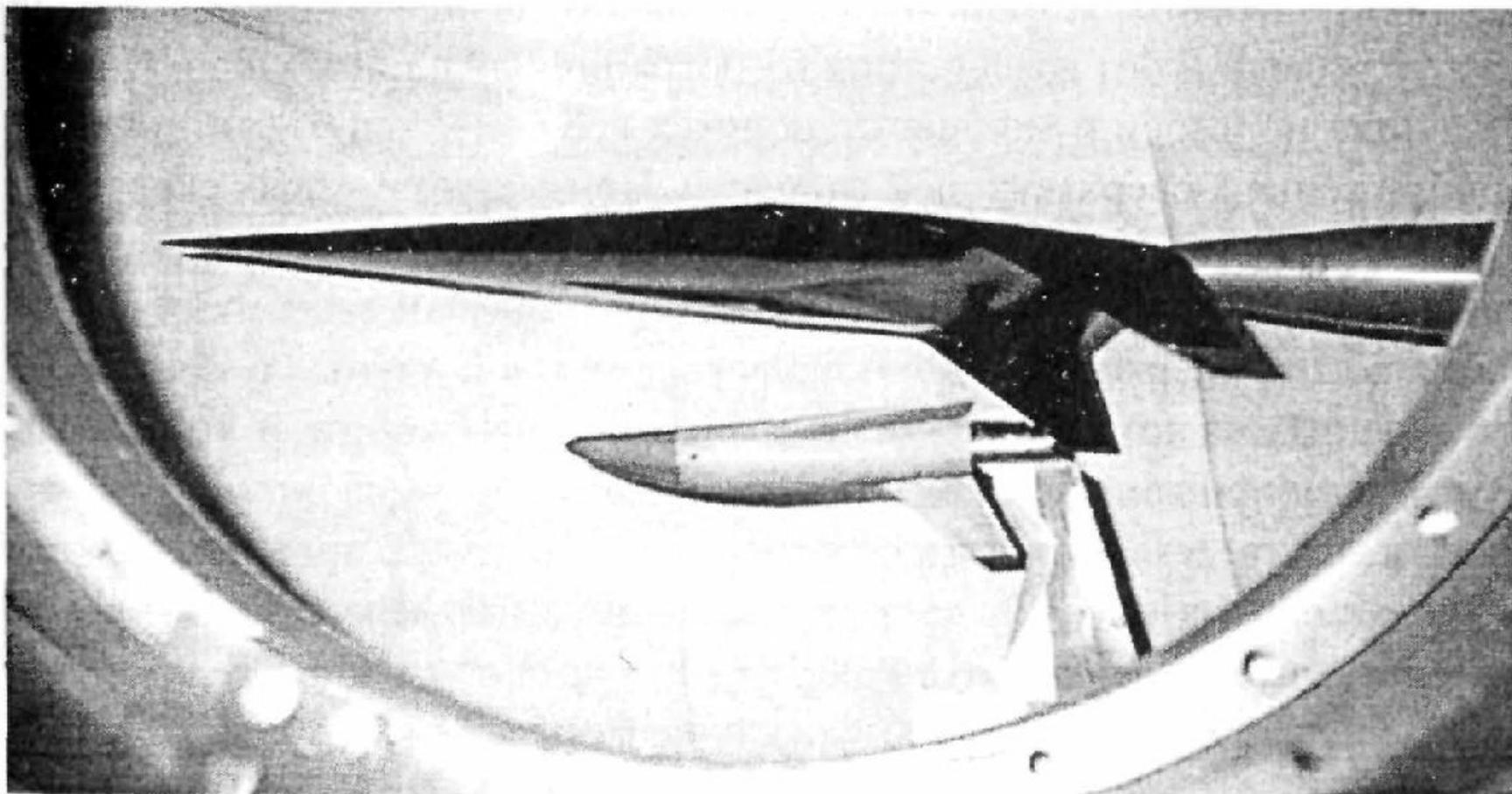
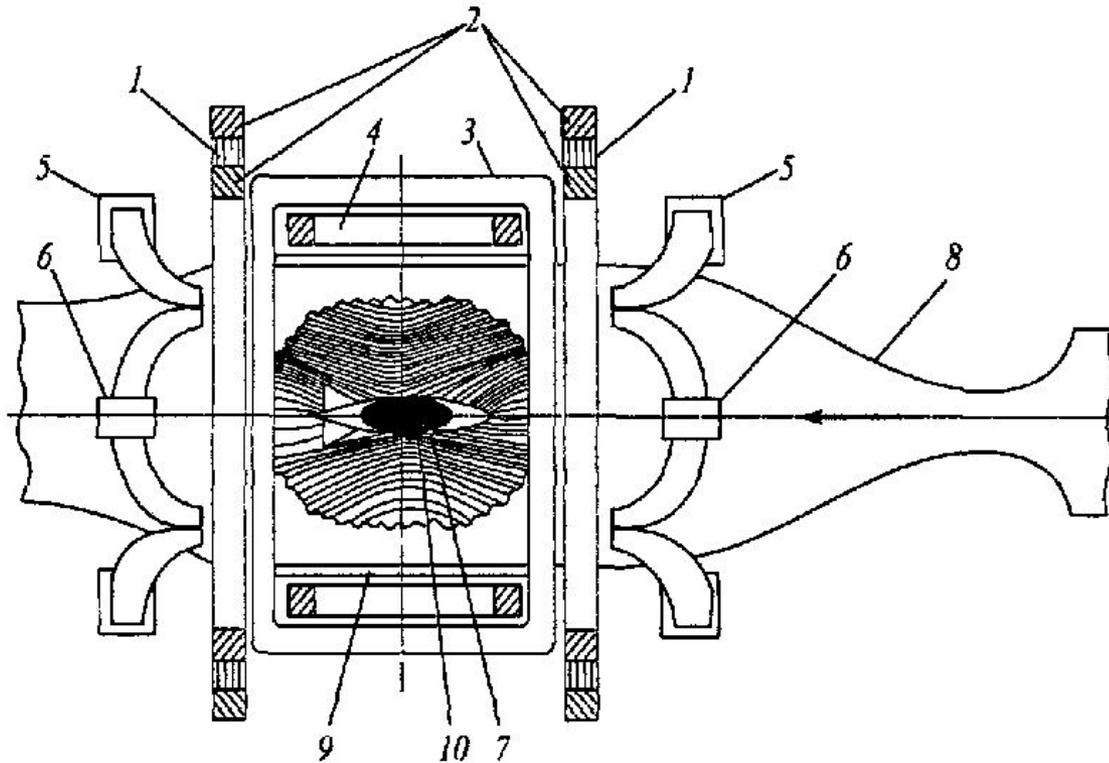


Рис. 1.29. Стенд, позволяющий варьировать взаиморасположение моделей первой и второй ступеней



*Рис. 1.30. Разделяющиеся модели системы в рабочей части Т-313*

# Электромагнитные весы



*Рис. 1.33.* Схема шестикомпонентной магнитной подвески и балансировки модели:

*1* – намагничивающие катушки; *2* – градиентные катушки сопротивления; *3* – катушки угла рыскания и крена; *4* – катушки угла тангажа и крена; *5* – градиентные катушки боковых сил; *6* – градиентные катушки подъёмной силы; *7* – магнитные силовые линии; *8* – аэродинамическая труба; *9* – катушки электромагнитного датчика положения; *10* – сердечник модели