

VI. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВ

§ 48. Единицы: масса, объем, плотность. Количество измеряемого вещества, будь то твердое, жидкое или газообразное, измеряется в единицах массы или объема.

Масса обычно исчисляется в килограммах или его подразделениях; большие количества в тоннах: $1 \text{ т} = 1000 \text{ кг}$.

В Германии употребительной единицей является фунт, равный 500 г. Для 100 фунтов = 50 кг узаконено название центнера, 100 кг составляет двойной или метрический центнер. У нас в СССР принята метрическая система, поэтому центнером называется масса в 100 кг.

Английский фунт несколько меньше германского; он равен 454 г.

Иногда количество вещества определяют в единицах веса. Вес тела в пустоте G равен произведению массы тела на ускорение свободного падения в данном месте: $G = mg$.

В технической системе основной единицей является не масса, а сила — и именно сила в один килограмм. В этой системе вес будет выражаться в килограммах. Для того, чтобы подчеркнуть различие между килограммом как единицей силы и килограммом как единицей массы, у нас в Советском Союзе введено обозначение $кг$ для массы в килограммах и $кГ$ для силы (или веса) в килограммах.

Объем обычно указывается в кубических метрах, сокращенно обозначаемых через м^3 или м^3 или его подразделениях. Часто за единицу вместимости принимают литр. Литр есть объем воды в один килограмм, при наибольшей ее плотности и при нормальном атмосферном давлении. Литр равен 1,000028 кубического дециметра. При технических измерениях можно принимать литр равным одному дм^3 .

Плотность тела (D) есть отношение массы тела к его объему; плотность выражается в граммах на кубический сантиметр (система CGS) или тоннах на кубический метр (система MTS). Часто плотность выражают в граммах на миллилитр (г/мл)

$$D = \frac{m}{V} \quad (1) \quad \text{или} \quad m = D \cdot V. \quad (1)$$

В технической системе часто применяют понятие удельного веса. Удельный вес равен отношению веса тела к его объему:

$$\gamma = \frac{G}{V} \cdot \frac{\text{кГ}}{\text{м}^3},$$

откуда

$$G \text{ (кГ)} = V \text{ (м}^3\text{)} \cdot \gamma \frac{\text{кГ}}{\text{м}^3}. \quad (1')$$

Очень часто плотность тела при данной температуре находят сравнением массы тела с массой воды в объеме тела, взятой при той же температуре. Для нахождения плотности тела необходим тогда пересчет. Если относительная

плотность алкоголя при 20° по отношению к воде при 20° оказалась равной 0,810, то плотность алкоголя при 20° равна

$$0,810 \cdot 0,9992 \frac{\text{г}}{\text{мл}} = 0,809 \frac{\text{г}}{\text{мл}}.$$

В пределах точности измерений до 0,01%, числовые значения плотности в граммах на кубический сантиметр и килограммах на литр совпадают между собой.

Плотность тела зависит от температуры; давление же оказывает ничтожное влияние на плотность твердых и жидких тел. Изменение длины при повышении температуры на 1°С, выраженное в дробных долях длины при 0°С, называется *коэффициентом линейного теплового расширения* α . При повышении температуры на 1° единица поверхности увеличивается на 2α , а единица объема на 3α . Коэффициент кубического расширения равен, примерно, 3α . Если взята из табличных данных плотность какой-нибудь жидкости при нормальной температуре равна γ_0 , то плотность этой жидкости при повышении температуры на Δt будет равна:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + 3\alpha \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Так как жидкости обладают большим коэффициентом объемного расширения, то очень часто нельзя пренебречь их тепловым расширением. При испытании холодильной установки необходимо определить количество соляного раствора, находящегося в железном испарительном чане; для этого в целях надежности испытания измеряют глубину рассола в чане, причем замер этот производится до и после испытания. Однако, при вторичном измерении температура успела несколько понизиться. Положим, что до испытания площадь дна чана была равна F (согласно рабочих чертежей), затем после произведенного опыта, вследствие охлаждения, стала равной лишь f . Пусть высоты уровней измеренных соляных растворов соответственно равны H и h , а объемы соответственно равны V и v . Тогда объем $V = HF$ и $v = hf$. Далее $F = f \cdot (1 + 2\alpha_1)$ и $V = v \cdot (1 + 3\alpha_2)$, причем $2\alpha_1 = 2 \cdot 0,000012$ — является поверхностным коэффициентом теплового расширения железа, а $3\alpha_2 = 0,0004$ — коэффициентом кубического теплового расширения соляного раствора. В этом случае, следовательно,

$$\frac{H}{h} = \frac{V}{v} \cdot \frac{f}{F} = \frac{1,0004}{1,000024} = 1,00037 \text{ и } H = 1,00037 h.$$

Данное соотношение действительно при разности температуры в 1°; при разности температур в 20°, уровни соляного раствора в чане до и после испытания разнятся друг от друга на 2,3%. Разность между двумя измерениями, при глубине чана в 2 м, окажется в 13 мм. Не следует для теплой воды принимать плотность $D = 1$, или $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$, так как при температуре в 75° погрешность превышала бы 2,5%. При холодной же воде температура имеет, конечно, небольшое влияние, так как изменения плотности воды вблизи температуры 4° незначительны (таблица 5).

Таблица 5

Плотность воды										
$t(^{\circ}\text{C})$	0	10	20	30	50	75	100	150	200	250
$\gamma(\text{кг/м}^3)$	999,9	999,7	998,2	995,7	998	975	958	917	863	794

§ 49. Приведенные или неприведенные объемы. Исчисление количества газов редко производится в килограммах. Вместо этого полученные объемы или плотности чаще всего приводятся к нормальному состоянию, т. е. к нормальному давлению в 760 мм ртутного столба и к температуре в 0°. Для приведенного значения объема действительно равенство

$$G = V_0 \cdot \gamma_0 \quad (3)$$

Когда объем приведен к нормальным условиям, следует точно указывать вставкой после обозначения, что это приведение произведено при $\left(\begin{matrix} 0^{\circ}\text{C} \\ 760 \text{ мм Нг.} \end{matrix} \right)$ или

сокращенно $\left(\frac{0^\circ}{760}\right)$. Указание приведенного объема равноценно указанию веса, так как для сухого воздуха, например, $1 \text{ м}^3 \left(\frac{0^\circ}{760}\right) = 1,293 \text{ кг}$, является постоянным числом. Символическим нулевым обозначением указывают, что речь идет о приведенном объеме V_0 или приведенном удельном весе γ_0 . Там, где даны указания количеств воды в мерах объема, количества воздуха необходимо оставлять неприведенными. Там же, где указания количеств воды даны по весу, необходимо сделать приведение количеств воздуха к нормальным условиям (об этом дополнительно будет сказано в ближайшем параграфе). Приведение производится согласно равенства (закон Мариотта и Гей-Люссака): приведенный удельный вес

$$\gamma_0 = \gamma \cdot \frac{273+t}{273} \cdot \frac{760}{p} = 2,78 \cdot \gamma \cdot \frac{T}{P_{\text{мм}}} \quad (4)$$

или приведенный объем

$$V_0 = V \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{p}{760} = 0,359 \cdot V \cdot \frac{P_{\text{мм}}}{T}, \quad (5)$$

где γ и V являются неприведенными, наблюдаемыми величинами, t — температурой в стоградусной шкале температур, $T = 273 + t$ — абсолютной температурой и p — существующее в то время абсолютное давление (часто барометрическое давление в мм Hg). В последнее время применяется также приведение к давлению $1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 735,5 \text{ мм Hg}$ и к температуре 20° ; приведение к 1 ат представляет преимущество постольку, поскольку давление выше атмосферного должно измеряться кг/см^2 . При 1 или 2 ат избыточного давления, объем предполагается тогда равным $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{3}$ его объема при нормальном состоянии и одинаковой температуре. Относительно температуры выше было сказано, что для технических измерений температуры в 20° принята, как нормальная (ОСТ 349). Это обозначение V_1 равноценно весовому обозначению: $1 \text{ м}^3 \left(\frac{20^\circ}{1}\right)$ сухого воздуха по весу равняется $1,165 \text{ кг}$. Следовательно, объем $V_1 = 293 \cdot V \cdot \frac{P_{\text{атм}}}{T}$. Показания в обоих нормальных состояниях относятся между собой как:

$$V_1 : V_0 = \gamma_0 : \gamma_1 = 1 : 0,902$$

или

$$V_0 : V_1 = \gamma_1 : \gamma_0 = 1 : 1,109.$$

В виде примера такого приведения служит следующий расчет: расход светильного газа в газовой машине был определен посредством газовых часов в $26,2 \text{ м}^3/\text{час}$, в то же время был произведен отсчет температуры в 19° и избыточного давления газа в $42 \text{ мм H}_2\text{O}$. Ртутный барометр показал давление в 749 мм при температуре ртути в 18° . Приведение барометрического давления к нормальным условиям производится по равенству $0,996 \cdot 749 = 746 \text{ мм Hg}$; $42 \text{ мм H}_2\text{O}$ равны $\frac{42}{13,5} = 3 \text{ мм Hg}$. Следовательно, при измерении давление газа составляет $746 + 3 = 749 \text{ мм Hg}$ и абсолютная температура газа $= 273 + |19 = 292^\circ$. Таким образом приведенный объем $V_0 = 0,359 \cdot 26,2 \cdot \frac{749}{292} = 24,1 \text{ м}^3 \left(\frac{0^\circ}{760}\right)/\text{час}$. Величина приведенного объема является руководящей для суждения о расходе топлива, так как от объема зависит теплопроизводительность топлива, а для этого необходимо сослаться на состояние, при котором дана эта теплопроизводительность. По другому способу расчета 749 мм Hg равнялось бы $1,019 \text{ ат}$, следовательно $V_1 = 293 \cdot 26,2 \cdot \frac{1,019}{292} = 26,8 \text{ м}^3 \left(\frac{20^\circ}{1}\right)/\text{час}$. В английской системе мер, измерения газа приводятся также к $760 \text{ мм Hg} = 29,922 \text{ дюймам}$ ртутного столба и к $32^\circ \text{ Фаренгейта} = 0^\circ \text{ С}$.

§ 50. Влияние влажности. Влажность, содержащаяся в газах, оказывает влияние на удельный вес последних. Вес водяного пара равен, примерно, лишь

0,6 веса соответственного объема воздуха. Насколько велика погрешность, если не обращать внимание на влажность, можно видеть из нижеприводимых примеров, для разбора которых нужно вспомнить закон Дальтона.

Пример. Температура 20° , барометрическое давление, т. е. давление воздуха плюс давление заключающегося в нем водяного пара, равно 750 мм. Сухой воздух при 20° и 750 мм Hg весит $1,189 \text{ кг/м}^3$. Воздух, насыщенный водяными парами при данной температуре, содержит (смотри таблицы водяного пара) 0,17 кг пара в 1 м^3 , причем давление его составляет 17 мм Hg, откуда давление одного воздуха равно $750 - 17 = 733 \text{ мм Hg}$. Кубический метр содержащегося в этой смеси воздуха весит поэтому

$$1,293 \cdot \frac{733}{760} \cdot \frac{273}{273 + 20} = 1,162 \text{ кг/м}^3.$$

Влажный воздух в целом весит, следовательно, $1,162 + 0,017 = 1,179 \text{ кг/м}^3$. Таким образом, при игнорировании влажности погрешность составляла бы 0,85%. Если бы относительная влажность при 20° равнялась 50%, то воздух весил бы $0,5 \cdot (1,189 + 1,179) = 1,184 \text{ кг/м}^3$.

Другой пример. Температура 50° . Барометрическое давление — 760 мм. Сухой воздух весит $1,093 \text{ кг/м}^3$. В насыщенном влажностью воздухе пар весит $0,083 \text{ кг/м}^3$ и упругость его равна 92 мм. При давлении в 668 мм воздух весит $0,961 \text{ кг/м}^3$. Насыщенный влажный воздух весит $1,044 \text{ кг/м}^3$, воздух средней влажности — $1,068 \text{ кг/м}^3$. Погрешность вследствие игнорирования влажности ~5% для насыщенного влажного воздуха и 2,5% для воздуха средней влажности. Таким образом, недопустимо игнорировать влажность воздуха (§ 131), либо в случае надобности произвести расчет, исходя из воздуха средней влажности. Таблица для влажного воздуха помещена в справочнике Hütte, 26 издание, т. I, стр. 538 (русское издание т. I, стр. 676).

§ 51. Когда следует указывать вес, когда — объем. В некоторых случаях объем газа следует приводить к нормальному состоянию (принципиально безразлично, к какому), в других — не следует. При испытании насоса выясняют, поднимает ли он воду на определенную высоту, измеряемую в метрах, питает ли он водой аккумулятор или паровой котел, преодолевая определенное измеренное в атмосферах давление. Необходимое количество работы насоса распределяет в первом случае поднятый вес, во втором — объем. Уравнение размерности указывает, что произведенная при этом работа равна: $1000 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м} = 10\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}$; но величина работы равна также: $1 \text{ м}^3 \cdot 1 \text{ ат} = 1 \text{ м}^3 \cdot 10\,000 \text{ кг/м}^2 = 10\,000 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2} = 10\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}$.

Если пренебрегать тепловым расширением воды, то при подъеме горячей воды насосом, может вкратиться ошибка до 10% и более, в том случае, когда мы вместо объема будем умножать вес поданной воды на давление в котле. При определении количества работы, потребной для питательного насоса, необходимо указывать количество питательной воды в кубических метрах, хотя решающим фактором для определения паропроизводительности котла является вес питательной воды. Условия еще нагляднее проявляются при работе вентилятора — машины, которая должна подавать воздух в пространство определенного давления, а потому являющейся аналогичной насосу. В данном случае, для расчета требуемой мощности необходимо произвести расчет определенного объема воздуха, который должен быть выведен из вентилятора, преодолевая определенное противодействующее давление, или же необходимо вести расчет определенного веса воздуха, который должен быть поднят на высоту, указанную в метрах воздушного столба. При правильном их проведении оба способа расчета приводят к одинаковому результату. Допустим, что вентилятор перемещает объем воздуха, измеряемый в $0,42 \text{ кг/сек}$ против давления в 182 мм водяного столба $= 182 \text{ кг/м}^2$. Эти данные измерены непосредственно. Кроме того, пусть удельный вес воздуха, соответствующий давлению (§ 50), температуре и влажности, определен в $1,20 \text{ кг/м}^3$. Тогда теоретически необходимая работа рассчитывается следующим образом: $0,42 \text{ кг/сек} = \frac{0,42}{1,20} = 0,35 \text{ м}^3/\text{сек}$, т. е. мощность будет

равна: $0,35 \text{ м}^3/\text{сек} \cdot 182 \text{ кг}/\text{м}^3 = 63,7 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} = \frac{63,7}{102} \sim 0,625 \text{ квт}$; или вычисляется так: удельный вес (холодной) воды равен $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$. Имея в виду, что водяной и воздушный столбы тогда друг другу эквивалентны, когда отношение их высот обратно пропорционально отношению их удельных весов (закон сообщающихся сосудов), то мы получим, что 182 мм водяного столба равны $182 \cdot \frac{10000}{1,20} = 151700 \text{ мм}$ воздушного столба = $151,7 \text{ м}$ воздушного столба. Итак, необходимо поднять $0,42 \text{ кг}/\text{сек}$ на высоту $151,7 \text{ м}$ соответственно затраченной работы в $0,42 \text{ кг}/\text{сек} \cdot 151,7 \text{ м} = 63,7 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}}$. Это совершенно точное совпадение двух результатов, отнюдь, не случайно; в обоих расчетах результат получается одинаковый: $\frac{0,42 \cdot 182}{1,20} = 63,7$.

Определенная поршневая воздуходувка всегда всасывает одинаковый объем воздуха, независимо от того, работает ли она в долине при барометрическом давлении 760 мм Hg или на горе при барометрическом давлении в 700 мм Hg , а также работает ли она летом или зимой. При оценке конструкции цилиндра, например, при определении объемного коэффициента полезного действия в расчет входит всасываемый объем воздуха. Было бы неправильно приводить этот объем к нормальному состоянию. Иначе, работая в долине, воздуходувка должна была бы давать иные результаты, чем при работе на горе. Точно так же, если воздуходувка работает в глубоком руднике или в дни с исключительно высоким барометрическим давлением, мы получили бы, что она поднимает больший приведенный объем, чем соответствующий размеру цилиндра. Однако, некоторые производства могут требовать, чтобы воздуходувка доставляла необходимое определенное количество



Рис. 126.
Ареометр.

воздуха по весу (например, для химических процессов). Испытание должно установить, выбрал ли конструктор достаточно большие размеры цилиндра и в таком случае необходимо объем газа привести к нормальным условиям. Ибо конструктор воздуходувки знал условия работы: будет ли компрессор работать при пониженном давлении или при высокой температуре, а также знал и достижимый объемный коэффициент полезного действия.

§ 52. Удельный вес жидкостей. Для удельного веса твердых тел можно пользоваться табличными данными технических справочников. При необходимости его определения можно руководствоваться указаниями, имеющимися в курсах физики.

Удельный вес жидкостей определяется при помощи ареометров. Погружаемый ареометр (рис. 126) изготавливается, большей частью, из стекла с уширенным полым телом и внизу имеет утяжеленный шарик для обеспечения устойчивого вертикального положения. Чем легче жидкость, тем глубже в нее погружается ареометр, тем незначительнее, следовательно, ее подъемная сила. Во избежание слишком длинной шкалы, обыкновенно как для жидкостей тяжелее воды, так и для жидкостей легче воды употребляют различные приборы. В свою очередь, с целью получить более крупные деления и тем повысить точность отсчета, обе эти области отсчета разделяют иногда между несколькими приборами. Такие подразделенные приборы получают с тонкими трубками для шкал, при которых влияние капиллярных сил на показание прибора более заметно. Здесь речь идет о том же явлении, как высота подъема в капиллярных трубках, но в обратном смысле. В таком случае прибор пригоден лишь для какой-нибудь определенной жидкости. Шкала ареометра бывает правильна лишь при определенной температуре, указанной на приборе. В настоящее время принята нормальная температура в 20°С . Строго говоря, прибор может употребляться только при этой температуре, потому что с температурой расширяется не только жидкость, но и сам прибор. Так как пересчет показаний невозможен, то необходимо было бы градуировать прибор для каждой температуры. Ареометр с обозначением «правилен при 20° », погруженный в воду температуры 20° ,

должен показать плотность не единицу, представляющую плотность $1 \frac{г}{см^3}$ воды, но согласно сказанному на стр. 123, прибор должен установиться на $\gamma = 0,999 \frac{г}{см^3}$. При погружении ареометра в воду с температурой 4° , он и в данном случае не должен был бы показать $1,000 \frac{г}{см^3}$, так как теперь ареометр уменьшился бы в объеме и показал бы поэтому несколько уменьшенный (очень немного) удельный вес. Конечно, тепловое расширение стекла (коэффициент линейного теплового расширения стекла $\alpha = 0,000008$, коэффициент объемного расширения $3\alpha = 0,000024$) невелико по сравнению с расширением большинства жидкостей (бензол $3\alpha = 0,00125$, керосин $3\alpha = 0,0017$, глицерин $3\alpha = 0,0005$). Следовательно, до тех пор, пока ареометр от изменения температуры не успел изменить свой объем, он будет правильно показывать удельный вес жидкости при любой температуре. Ареометр применяется преимущественно для определения состава разных растворов: содержания воды в алкоголе, содержания соли в растворе поваренной соли, для чего опять-таки необходимо пользоваться соответствующими переводными таблицами. Так как, например, для крепкого спирта изменению содержания последнего на 1% соответствует изменение плотности на 0,35%, то всякая погрешность при измерении плотности увеличивает в 3 раза погрешность в вычислении содержания спирта и вместе с тем его теплопроводной способности.

Весовой ареометр изготавливается преимущественно из металла. Он состоит из веретенообразного, внизу утяжеленного поплавка, вверху которого помещен проволочный стержень с чашкой на верхнем конце для приема груза. На плавающий ареометр накладываются грузы до тех пор, пока он не погрузится в жидкость до установленной на шейке метки. Потребным для этого грузом и определяется плотность испытуемой жидкости. Таким образом в данном случае дело идет о нулевом методе (§ 11); чувствительность прибора относительно велика и применением соответствующих отношений между диаметром проволоки и объемом поплавка можно добиться любого повышения чувствительности за счет предела измерения. Плотность определяется также разностью весов погружающегося поплавка в воде и в испытуемой жидкости или путем сравнения веса воды и испытуемой жидкости, необходимого для наполнения измерительного сосуда (пикнометр). Во всяком случае, следует заботиться об одинаковых температурных условиях, так как при отклонении от существующей температуры имеют место те же соображения, что и относительно изменения объема воды, жидкости и поплавка или измерительного сосуда.

§ 53. Плотность газов. Определение плотности газов часто не является самоцелью, так как в большинстве случаев по плотности газов делают вывод о содержании CO_2 в дымовых газах, о теплопроводной способности светильного газа и т. д., так как эти величины могут быть примерно определены по плотности. Плотность газов часто дается по отношению к сухому воздуху. Сухой воздух при 0° и 760 мм барометрического давления весит $1,293 \frac{кг}{м^3}$. Газ плотностью 0,91 при 0° и 760 мм барометрического давления весит, следовательно, $1,293 \cdot 0,91 \frac{кг}{м^3}$. Определение плотности по воздуху имеет то преимущество, что оно не зависит от давления и температуры, так как по закону Мариотта и Гей-Люссака все газы одинаково ведут себя при воздействии давления и температуры. Так как пары не следуют точно этому закону, то сравнение их плотности с плотностью воздуха имеет меньше преимущества, поэтому при точных расчетах необходимо следить также за давлением и температурой.

Плотность определяется прибором Шиллинг-Бунзена для истечения (эффузиометр) (рис. 127) следующим образом. Прибор наполнен водой и состоит из сосуда с металлическими оправами. Внутреннюю трубку можно поднимать и опускать, при использовании же кранов c и d можно попеременно всасывать внутрь газ через кран c и выкачивать его через кран d до тех пор, пока приключенный к крану c газопровод заполнится газом, освободившись от воздуха. Тогда внутренний сосуд наполняют газом и закрывают оба крана. Если теперь открыть кран d таким образом, чтобы газ под давлением водяного столба выходил через тонкое отверстие, находящееся в расположенной над краном d плати-

новой пластинке, то можно при помощи секундомера установить время, протекающее между прохождением уровня воды через обе метки *a* и *b*. Во второй раз прибор заполняется воздухом, которому дают вытечь, и снова наблюдают время между прохождением его через обе метки. Тогда оба удельных веса относятся друг к другу как квадраты времени их истечения. Объясняется это тем, что при обоих испытаниях во время наблюдения, благодаря выравниванию уровня воды, освобождается одинаковая работа, поэтому и сообщаемая газу кинетическая энергия $\frac{1}{2} \cdot m v^2$ должна в обоих случаях иметь одинаковое значение. Таким образом $\frac{1}{2} \cdot m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot m_2 v_2^2$ или $\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2^2}{v_1^2}$. Протекающие массы *m* прямо пропорциональны плотности газа, а скорости *v* обратно пропорциональны времени наблюдения *t*, откуда $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$.

Соотношение $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$ действительно только для газов, имеющих одинаковое число атомов в молекуле и одинаковую вязкость. В остальных случаях простой закон истечения является приблизительным. Поэтому в случаях измерения большой точности, необходимо эмпирически определить для данного прибора отклонения от простого закона Бунзена.

Прибор Бунзена первоначально был устроен для ртутного наполнения. В этом случае прибором пользуются для испытания газа и в сухом состоянии. Однако, содержание влажности, которое в обоих измерениях присоединяется к плотности как незначительная константа, не имеет большого влияния на образуемые частные. При температурных изменениях меняются и условия в приборе, вследствие чего необходимо оба испытания производить в одинаковых температурных условиях. Нецелесообразно также производить определение постоянной истечения для воздуха раз навсегда; оба испытания следует производить вслед один за другим, так как небольшое выпускное отверстие легко может со временем измениться. Перед производством испытания прибор следует прочистить от пыли. В *газовых весах* фирмы Люкс (рис. 128) газ протекает через полый стеклянный или металлический шар *A*, входя через *b* и выходя через *c*.

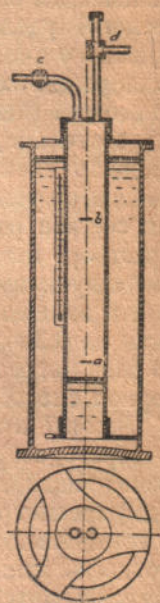


Рис. 127. Эффузиометр Шиллинга-Бунзена.

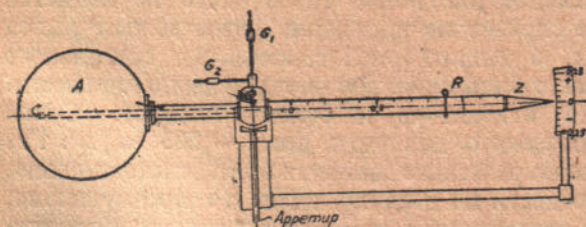


Рис. 128. Газовые веса.

Шар, как часть весов с коромыслом, покоится на стальной призме и подымается и опускается смотря по удельному весу находящегося в нем газа. Газ подводится и выводится при помощи ртутного затвора *Q*. Отклонение стрелки *z* указывает плотность, отнесенную к окружающему воздуху. Если отклонения стрелки становятся очень большими, то можно использовать еще рейтер *R*, который помещают по желанию в различные зарубки коромысла. Показания по рейтеру и по стрелке суммируются и получают, таким образом, удельный вес проходящего газа. Если через прибор проходит только воздух, то если рейтер стоит на 1,0, стрелка прибора должна показывать 0. Если переставить рейтер на деление 0,8, то стрелка должна указывать +0,2, так как $0,8 + 0,2 = 1,0$. Юстировка весов производится навинчивающимися грузами *G*₁ и *G*₂ (стр. 23). Манометр *M* и термометр *T* указывают давление и температуру протекающего газа. Газовые веса должны стоять, конечно, горизонтально; веса должны устанавливаться задолго до их использования, чтобы они приняли температуру окружающей среды. Газовые веса показывают разность удельных весов. Если газовые веса помещены в футляр, то необходимо следить за тем, чтобы не было проникновения даже следов испытуемого газа в пространство, окружающее веса, ибо может

вызвать изменение плотности окружающего воздуха, а вместе с тем изменить показания газовых весов. Газовые весы применяются большей частью для стационарной работы, прибор же для истечения удобней для переноски. Вертикальные газовые весы состоят из вилкообразной вертикально установленной (рис. 130) стеклянной или металлической трубки длиной около 1 м. Всасывание производится сверху посредством водоструйного насоса, аспиратора или даже тяги дымовой трубы, применяемой в особенности при испытании дымовых газов. Через обе трубки просасывают с одной стороны воздух, с другой — исследуемый газ. Если ответвления *A* и *B*, расположенные на одинаковой высоте, притом на *h* м ниже места соединения обоих газовых потоков *c*, привести с обеих сторон в сообщение с дифференциальным манометром достаточной чувствительности, то можно измерить разность давления между *A* и *B*. В каждом газе или жидкости давление повышается в направлении сверху вниз, примерно, на $\gamma \text{ кг/м}^2 = \gamma \text{ мм H}_2\text{O}$ на каждый метр высоты уровня, если удельный вес среды равен $\gamma \text{ кг/м}^3$; отсюда следует, что $\gamma_1 = \gamma_0 + \frac{\Delta p}{h}$. Так

как подводящие трубки от ответвления *A* и *B* к дифференциальному манометру наполняются засасываемым газом, то необходимо позаботиться о том, чтобы эти трубки были расположены

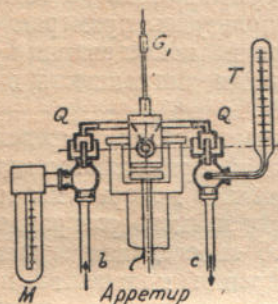


Рис. 129.

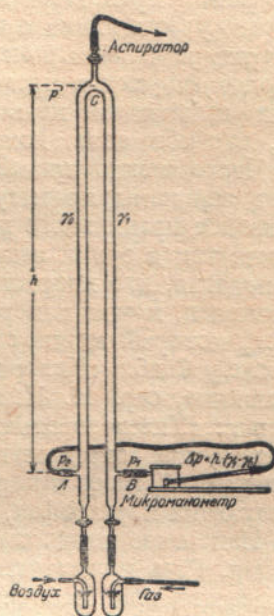


Рис. 130. Весы для газовых столбов.

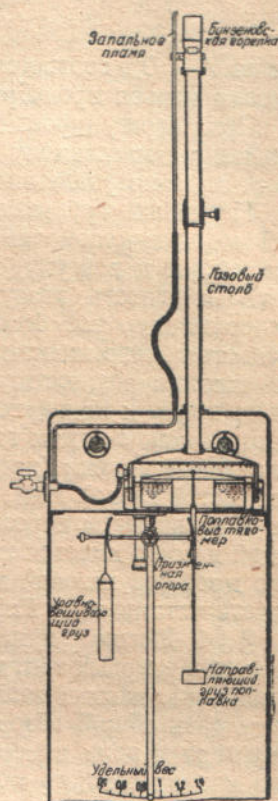


Рис. 131. Газовые весы.

горизонтально. Ширина обеих трубок должна быть достаточной, чтобы газ в них протекал медленно, засасывание газа в обе трубки должно производиться с одинаковой силой, что можно определить при помощи газовых промывателей, которые вместе с тем обеспечивают и одинаковую температуру и влажность обоих газовых потоков. Прибор, изображенный на рис. 131, представляет собой также вертикальные газовые весы, изготовляемые за последнее время вместо указанных на рис. 128. Измеритель давления с колоколом показывает разность давлений $h(\gamma_1 - \gamma_0) = \Delta p$ в трубке по сравнению с внешним воздухом. В верхней части приборов происходит сжигание газов. Регулировка прибора производится установкой трубки соответственной длины. Грузы не являются измерительными. Внешней направляющей силой является погружение колокола, как это указано на рис. 85.

Все описанные здесь приборы сравнивают плотность исследуемого газа с плотностью воздуха и зависят, следовательно, от давления, температуры и содержания влаги. Прибор Бунзена-Шиллинга для истечения измеряет отношение плотности, которое не зависит от состояния газа, если эти два состояния одинаковы. В приборе Шиллинга это в большинстве случаев происходит из-за водяного наполнения. Другие измерительные приборы измеряют только разность

плотности и эта разность даже при условии, что состояния обоих газов одинаковые, пропорциональна плотности воздуха. Если при состоянии (t, b) был произведен отсчет δ' плотности, то относительная плотность газа при нормальных условиях $(0,760)$ равна:

$$\delta = 1 - (1 - \delta) \cdot \frac{273 + t}{273} \cdot \frac{760}{b}. \quad (7)$$

При температуре 20° и давлении 740 мм плотность станет равной

$$\frac{1 - \delta}{1 - \delta'} = \frac{293}{273} \cdot \frac{760}{740} = 1,102.$$

Отсчет $\delta' = 0,5$ соответствует, следовательно, $\delta = 0,449$; таким пересчетом никоим образом нельзя пренебрегать.

При отрегулировании прибора необходимо, естественно, уяснить себе, к какому нормальному состоянию желательно привести все результаты и необходимо вышеуказанный расчет произвести в обратном порядке.

Несколько труднее точно учесть влияние влажности. Водяной пар, отнесенный к одинаковой температуре и одинаковому давлению, имеет плотность, отнесенную к воздуху, колеблющуюся в пределах $0,62$ и $0,68$. С прибавлением влаги плотность воздуха становится меньше, светильного газа — больше. Следовательно, тот факт, что оба газа являются одинаково влажными, не уменьшает погрешности. Часто можно пренебречь влиянием влажности, которое никогда не достигает величины предыдущей поправки. Когда хотят работать точно и придерживаться правильного приведения к сухому газу, лучше работать как с сухим газом, так и сухим воздухом, пропуская оба через хлоркальциевые трубки (предполагая, что хлористый кальций не поглощает составных частей газов). Или, наконец, можно измерить содержание влаги в обоих газах и произвести пересчет, который можно сделать, пользуясь примером § 50. Такой пример имеется также у Слаби: «Калориметрические исследования кругового процесса газовой машины», стр. 11. Незначительная погрешность в этом расчете установлена Габером: «Углеводороды», стр. 22.

§ 54. Методы измерения при определении количеств. При определении количеств твердых тел, жидкостей, газов и пара в технике применяются методы, изложенные нами в последующих параграфах, относительно которых мы сперва хотим дать общий обзор. Измерение количества требует четкого разграничения характера и цели измерения. Речь может идти или об определении ограниченного изолированного количества или, в случае измерения количества протекающих жидкостей, газов и паров, требуется измерить количество, протекающее через прибор или проводку в единицу времени. В первом случае наименование указывается в кг или m^3 , а во втором случае в $кг/сек$ или $m^3/час$. Измерение изолированного количества у твердых тел производится большей частью путем взвешивания на весах различных конструкций; у жидкостей же, кроме взвешивания, производится также измерение калиброванными сосудами. Газы же лишь в редких случаях определяются взвешиванием, большей же частью измерением объема, а именно, либо измерением изменения объема при отборе газа из колокола с водяным затвором при постоянном давлении, либо отбором газа из пространства с известным объемом и наблюдением изменения его давления.

При измерении длительно протекающих количеств жидкости, газа или пара, применяются специфические технические методы. При установках, предназначенных для длительных замеров, часто применяются весы или калиброванные сосуды. Пар измеряется тогда большей частью в виде образовавшегося из него конденсата либо до испарения в виде воды. Другой способ, применяемый для измерения жидкостей и газов, применяемый в широких пределах, базируется на том, что проходящий через поперечное сечение объем V определяется поверхностью F поперечного сечения и средней скоростью v в данном сечении, т. е.

$$Vm^3/сек = F m^2 \cdot v м/сек. \quad (8)$$

Необходимо, следовательно, измерить поперечное сечение и определить скорость одним из способов, описанных в главе V. Впрочем, для жидкостей

газов и пара можно применять дроссельные приборы. Измеряют разность давлений, необходимую для проведения измеряемого количества через сужение; разность давлений для определенного отверстия возрастает с количеством; таким образом, по разности давлений можно судить о количестве. Этот принцип подвергается многообразным вариациям и при жидкостях приводит к измерению посредством диафрагм.

Водомеры, газомеры и паромеры служат для измерения особого рода. Они, вообще, должны производить не только кратковременные измерения, но, главным образом, обслуживать практическую потребность производства и давать показания всего количества, протекающего в любой момент, т. е. самостоятельно должны производить суммирование его. Это задание выполняют обычные водомеры и газомеры при измерении лишь умеренных количеств. У парометров самостоятельное суммирование осуществлено еще не так удовлетворительно и суммирование приходится производить вручную планиметрированием диаграмм, регистрирующих проходящее в течение определенного времени количество пара. Этот способ, применяемый преимущественно для измерения только очень больших количеств воды и газа, имеет недостатки и преимущества. Недостаток заключается в том, что необходима затрата работы, а преимущество — в том, что все количество не только становится известным из конечных результатов, но диаграмма дает также представление о количестве и распределении потребления по времени. Следовательно, самопишущий водомер является не только измерительным, но и контрольным прибором. В тех случаях, когда измеряемое количество потребляется или перемещается посредством поршневой машины, индикаторная диаграмма машины дает средство для определения количества, годное, однако, только для определенных целей. Часто важен вопрос о возможности перенесения метода измерения или о применении измерительного прибора для измерения других веществ, чем тех, для которых он предназначался вначале. Испытаны же они преимущественно только для воды или воздуха. Однако, результаты использования одного и того же прибора по разным назначениям могут быть весьма различными, как это показывают несколько примеров. Очевидно, что газовые часы одинаково хорошо показывают объемы, независимо от того, будет ли измеряться воздух, светильный газ или водород. Для аммиака необходимо избегать применения бронзовых частей. При мокрых счетчиках применяют иную вместо воды запорную жидкость; тогда не может быть принципиальных возражений против перенесения этого метода. Сухие газовые часы не будут неправильно показывать даже при водороде, так как даже наличие проницаемости уплотняющих поршневые диски мембран не оказывает влияния, если с обеих сторон давление водорода практически одинаковое. Если водомер Вольтмана имеет вращающееся колесо такой формы и такие незначительные сопротивления, что он работает практически без скольжения, то колесо совершенно без завихрений как бы ввинчивается в поток. В таком случае нет никакого основания предполагать, что прибор, отградуированный для воды, будет давать неправильные показания объема менее плотного бензина или умеренно вязкого масла. Требование отсутствия скольжения должно быть выполнено для всех отдельных частей лопаточного устройства водомера потому, что при лопаточном устройстве из плоских и наклонных крыльев, аналогичных вертушке анемометра, некоторые части каждого крыла будут способствовать движению, другие будут тормозить. Представляется невероятным, чтобы общая величина всех возникающих при этом сложных явлений не зависела от свойств жидкости, в особенности от ее удельного веса и вязкости. Для того, чтобы добиться полного отсутствия скольжения, в водомере Вольтмана не должно было бы быть чисто винтового устройства лопаток, но подогнанное к разным скоростям потока в различных расстояниях от оси. Около стенки трубы шаг винта должен был бы сильно уменьшаться и при том в направлении, зависящем от закона распределения скоростей. Этот закон распределения не постояен. Это послужило основанием того, что на практике решили применить конструкцию водомера Вольтмана с лопаточным устройством, незаполняющим всего его поперечного сечения; Такие водомеры, если они только имеют лопаточное устройство, должны широко применяться. Поршневые и дисковые водомеры, без сомнения, работают одина-

ково при всех видах жидкостей, в то время как крыльчатые водомеры, вероятно, должны подвергаться влиянию вязкости и несколько меньше — влиянию плотности жидкости. Особенные трудности возникают при измерении очень больших количеств, так как не всегда имеются очень большие измерительные приборы, но даже при наличии приборов довольно трудно их проверить. Мы хотим сперва ознакомить читателей с одним общепотребительным способом, при помощи которого при случае можно избежать этих затруднений.

§ 55. Определение количеств по правилу смешения. При измерении больших количеств, непосредственное измерение которых особенно затруднительно, можно пользоваться, смотря по обстоятельствам, так называемым правилом смешения. При испытании газовых машин часто для измерения расхода газа применяются газовые часы и очень редко применяются воздушные часы для измерения количеств воздуха, подведенного для сжигания. Такие часы не применяются при контроле нормальной работы газовой машины, так как нет необходимости знать количество воздуха, ибо последний ничего не стоит¹. При помощи правила смешения можно определить, какое количество газа поступило в воздух, если измерять при этом какую-нибудь индифферентную, составную часть газа до и после смешения воздуха с газом. Общее количество этой индифферентной составной части при смешении не может измениться. В приводимом примере — смешение газа с воздухом — лучше всего сравнить процентное содержание кислорода O_1 и O_2 в газе до и после смешения. Как известно, содержание кислорода в воздухе составляет 21%. При смешении G м³ газа с L м³ воздуха, общий объем смеси = $(G + L)$ м³, где известно только G .

L — необходимо рассчитать, пользуясь следующим равенством:

$$\frac{O_1}{100} \cdot G + \frac{21}{100} L = \frac{O_2}{100} \cdot (G + L),$$

откуда

$$L = \frac{O_2 - O_1}{21 - O_2} \cdot G. \quad (9)$$

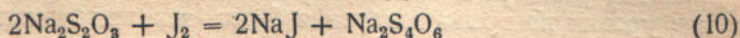
Этим путем измерение количества воздуха сводится к измерению (меньшего) количества газа и к определению процентного содержания кислорода в двух точках замера. Для определения процентного содержания кислорода служит прибор Орса (§ 145). При отсутствии кислорода в газе этот способ упрощается.

Определение количества отходящих газов в процессах сгорания основано также на аналогичной идее (§ 150), так как участвующее в процессе сгорания весовое количество углерода должно оставаться без изменения до и после сжигания.

Следующим примером применения правил смешения является определение *свободного обмена воздуха какого-нибудь пространства*. Во всяком отапливаемом помещении происходит обмен воздухом с окружающим пространством — через поры стен и потолков, через щели дверей и окон. Измерение количества воздуха иногда может быть желательно, но прямым путем оно почти невозможно. Поэтому для измерения примешивают к воздуху помещения газ, индифферентный как в гигиеническом отношении, так и в отношении поглощения его стенами и примесь которого можно легко и надежно установить. С течением времени наблюдается уменьшение содержания этой составной части. Подсчеты дают количество воздуха, поступившего при воздухообмене. При использовании CO_2 в качестве индифферентного газа необходимо считаться с тем, что окружающий нас воздух содержит до 4,00% CO_2 и что нельзя вводить в помещение воздух, выдыхаемый при дыхании, содержащий 4% CO_2 . Определение процентного содержания углекислоты производится с большой точностью посредством поглощения ее баритовой водой и титрования щавелевой кислотой (способ Петтенкофера, Л.). *Большие количества воды в турбинных и насосных установках измеряются по способу засолонения*, путем прибавления (в водопроводе) перед

¹ Измерение холодного и подогретого воздуха имеет весьма существенное значение в металлургической промышленности и ряде химических производств, а также для контроля тепловых процессов теплосиловых агрегатов.

турбиною определенного количества соляного раствора. Химическим путем определяется за турбиной, действующей как смеситель, процентное содержание соли в проходящей воде. В качестве примеси пользуются серноватисто-кислым натром (гипосульфит). Содержание ее в водном растворе определяется титрованием иодным раствором с применением в качестве индикатора крахмального раствора. Реакция протекает согласно следующего уравнения:



(тетратионово-кислый натрий).

Весь иод, прибавляемый к раствору серноватисто-кислого натра, остается в связанном состоянии до тех пор, пока имеется указанный натр. По использовании последнего остатка серноватисто-кислого натра, иод остается свободным и при наличии крахмального раствора обнаруживается синим окрашиванием. Молекулярные веса иода: $\text{I}_2 = 127$, а кристаллов $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 248$. Как исходным материалом пользуются $1/10$ нормальным иодным раствором, т. е. содержащим в одном литре десятую часть граммолекулы. Итак, децинормальный иодный раствор содержит в одном литре раствора ($1/10 \cdot 127 = 12,7$ грамма I_2). Этот раствор можно получить в аптеке или изготовить следующим образом: 12,7 г сухого и чистого иода растворяют в одном литре воды с 20 г КJ. Во время реакции иодистый калий ведет себя индифферентно (10) и служит для увеличения растворимости в воде. Каждый литр этого раствора соответствует содержанию 24,8 г безводного кристаллического серноватисто-кислого натра в испытываемой водяной пробе. В качестве крахмального раствора применяют жидкий свежесготовленный крахмальный клейстер. Один грамм крахмала растирается с небольшим количеством воды в равномерную кашку, смешиваемую с 150—200 см³ кипящей воды. Эту смесь оставляют кипеть в течение нескольких минут, пока она не станет прозрачной; тогда ее оставляют отстаиваться в течение нескольких часов и фильтруют через бумагу. В продаже имеется долго сохраняющийся крахмальный раствор. Для титрования применяют бюретку, стеклянную колбу и держатель для бюретки (рис. 132). В колбу наливают 200 см³ титруемой жидкости, бюретка же наполняется иодным раствором, разбавлять который следует так, чтобы окрашивание в колбе наступало после затраты 20—30 см³ иодного раствора. К содержащейся в колбе жидкости примешивают несколько капель крахмального раствора. Производится отсчет начального уровня иодного раствора в бюретке, этому раствору дают течь в колбу то скорее, то медленнее, при этом колбу постоянно встряхивают. Вскоре местами появляются синие окрашивания, которые при встряхивании колбы исчезают. Тогда кран устанавливается таким образом, чтобы каждые 10 секунд падала одна капля иодного раствора. Внимательно наблюдают, от капли до капли, пропадают ли еще при встряхивании местные синие окрашивания. Положенная под колбу белая подстилка и установленная на ней для сравнения другая колба с начальным раствором облегчает при больших разбавлениях возможность заметить, после какой именно капли местное окрашивание больше не исчезает, но передается всей жидкости колбы в виде слабого голубого оттенка. Тогда кран закрывают и отсчитывают уровень иодного раствора в бюретке. Вполне понятно, что бюретка к началу опыта должна быть наполнена вплоть до выпускного отверстия; перед началом опыта следует выпустить некоторое количество раствора. При наполнении не следует также разбавлять иодный раствор остатком воды, еще находящимся в бюретке. Поэтому бюретку рекомендуется предварительно сполоснуть этим же раствором. Разбавление соляного раствора производится измеряемым количеством воды неизвестного состава, части которого могли бы оказывать влияние на реакцию, например, связыванием иода. Поэтому опыт должен быть поставлен так, чтобы получившийся на месте измерения раствор сравнивался с другим раствором, изготовленным из той же воды, аналогичной, но точно определенной концентрации.

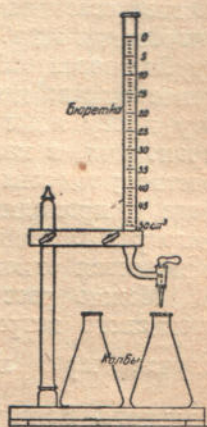


Рис. 132. Устройство для титрования.

Поэтому можно обойтись и без проверки того, был ли начальный раствор точно децинормальным. Таким образом подача воды центробежным насосом определяется следующим образом: водный раствор серноватисто-кислого натра из расчета 1 кг натра на 2 кг воды плотности 1,20 г/см³ устанавливается на весы таким образом, чтобы можно было измерять отсосанный всасывающей трубой насоса вес раствора в единицу времени. Весы стоят настолько высоко, что падение уровня во время измерения будет незначительным в сравнении с всасывающим действием насоса. Таким образом всасывается постоянное количество жидкости. Производят по возможности несколько промежуточных отсчетов с целью убедиться, происходит ли равномерное всасывание. Тогда, посредством проводки с краном, дают возможность соляному раствору всасываться и подгоняют всасываемое количество так, чтобы раствор разбавился в удобном для титрования виде. После того, как насосом все хорошо перемешано, из напорной трубы насоса отбирается проба этой смеси. Это повторяют несколько раз в течение опыта; незадолго до этого необходимо взять пробу несмешанной воды. Эту пробу воды подгоняют с раствором серноватисто-кислого натра в такой пропорции, в какой рассчитывают получить при всасывании насосом крепкий раствор; титрованием определяют, с одной стороны, эквивалентное количество иода J, прошедшего через насос раствора, с другой стороны J — раствор известного разбавления. Отношение обоих примененных количеств иодного раствора и является отношением обеих соляных концентраций.

Можно рассчитывать на 5000-кратное разбавление раствора серноватисто-кислого натра, являющегося, приблизительно, 1,61-нормальным. В таком случае через насос проходит соляной раствор крепостью $\frac{1,61}{5000}$ 1/3100-нор-

мального. Если титруют $\frac{1}{500}$ нормальным иодным раствором (т. е. разбавляют 20 см³ первоначального децинормального иодного раствора дистиллированной водой до 1000 см³ = 1 л), то необходимое для появления окрашивания количество иодного раствора относилось бы к количеству, находящемуся в колбе, как 500 : 3100 = 1 : 6,2, если точно было достигнуто 5000-кратное разбавление и если бы использованная вода была нейтральна. Если в колбу помещают 200 см³, то необходимо 200 : 6,2 = 32,3 см³ иодного раствора, что для точности измерения является подходящим количеством. При указанных отношениях разбавлений появление окрашивания можно определенно заметить в пределах 5—6 капель. Для точности лучше было бы применять более сильную концентрацию, дающую окрашивание уже при одной капле, но более сильное разбавление выгодно с точки зрения экономии. 6 капель = 0,3 см³ обозначают почти 1% использованного иодного раствора в количестве 32,3 см³ и точность в этом отношении получается удовлетворительная.

Если вода небесцветна, то следует применять значительно более высокие концентрации окончательного смешения. Для воды же, сильно реагирующей с иодом и соляным раствором, этот способ может оказаться совершенно неприменимым. Этот способ неприменим, например, для определения количества соли в холодильных установках, если речь идет о растворе хлористого магния. Во всяком случае, для точности необходимо проделать предварительное испытание употребляемых количеств и разбавлений. Вместо соли также примешивают красящее вещество. Концентрация после смешения с измеряемым количеством воды определяется посредством разбавления пробы первоначального красящего раствора, что определяется, на глаз в колориметрических приборах (имеется в продаже в магазинах Союзлаборреактива). Красящим веществом обычно служат флюоресцеин, который при разбавлениях от 1 : 100 000 до 1 : 1 000 000 количественно определяется довольно точно. В небесцветной воде эозин лучше заметен, но зато его требуется больше. Концентрация раствора эозина в пропорции 1 : 1000 (Л.) дает точность в 1,5%, хотя автору не удалось достигнуть указанной точности.

Впрочем, точность таких измерений зависит от того, насколько хорошо перемешивается жидкость, что в наилучшем виде достигается применением колес Пельтона. Измерить количество воды, имеющееся для проектируемой силовой

установки, можно указанным способом лишь в том случае, если течение воды беспокойно, и если место отбора будет на достаточном расстоянии от места подмешивания красящих веществ. Так как для этой цели не требуется большой точности, то пользуются способом определения скорости соляного раствора; для этого в водный поток коротким толчком вводится концентрированный соляной раствор и наблюдают по изменению проводимости, через какое время соль достигнет наблюдательного пункта на известном расстоянии вниз по течению (Л.).

ОПЫТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВ

§ 56. Весы. Весы служат для определения веса. При помощи весов, даже при умеренной аккуратности, можно определять количество с точностью, далеко превосходящей требующуюся при испытании машин. Измерение веса не зависит от температуры, тогда как при измерении объема с ней приходится считаться, а это порой трудно осуществить. Поэтому, как правило, рекомендуется производить взвешивание всюду, где это только возможно. При прочих равных условиях вес какого-нибудь тела, измеряемого взвешиванием, различен в зависимости от того, находится ли оно в воздушном или безвоздушном пространстве. В воздушном пространстве оно весит легче, соответственно весу вытесняемого им объема воздуха. Количество вещества определяется его весом в *безвоздушном пространстве*, так как иначе это определение зависело бы от барометрического давления и от температуры. Указания на удельную теплоту, удельный вес и т. п. относятся к безвоздушному пространству, в отношении же газов, другое указание совершенно невозможно. 1 м³ воды весит 1000 кг и вытесненный им воздух весит 1,3 кг при 0° С или 1,2 кг при 20° С. Получается погрешность в 0,13 или 0,12%, если не делать приведения к безвоздушному пространству, что, конечно, не применяется при измерениях количеств в повседневной жизни. В весах с гирями эта погрешность уменьшается вследствие потери веса самой применяемой гирей. Ускорение силы тяжести g уменьшается при повышении на 1000 м над уровнем моря на 0,03%. В то время, как одними и теми же пружинными весами или мессдозой вес в двух местах определяется весьма различно, это определение весами с гирями повсюду одинаково. Если весами пользуются как динамометром, то весы с гирями, при одинаковых объективных условиях, показывают различно. Это является слабой стороной технической системы мер, но для технических целей эти различия в Европе значения не представляют. От полюса к экватору эти различия достигают 0,5% и лежат, следовательно, в пределах точности технических измерений (таблица 32).

§ 57. Весы основаны на законах равновесия рычагов. Точки опоры осуществляются посредством применения призм и подушек (рис. 133). Каждое коромысло или балка весов должна иметь три призмы. Коромысло опорной призмой опирается на станину весов, а концевая призма передает вес груза на рычаг. Часто рычаг имеет и вторую концевую призму, которая передает вес измеряющих гирь. На рис. 134—137 даны изображения типичных конструкций весов. Призмы обозначены кружками (Л.).

Для технических целей применяются, главным образом, мостовые весы. Груз устанавливается на горизонтальной платформе или мосту, который при своем вертикальном перемещении всегда остается в горизонтальном положении. Поэтому, по закону возможных перемещений совершенно безразлично, в каком месте платформы находится груз. В чашечных весах это достигается качанием чашек, что вполне совершенно только тогда, когда чашки могут свободно качаться перпендикулярно коромыслу, т. е. когда они имеют карданный подвес.

Основной формой параллельного направления для мостовых весов является симметричный двойной рычаг согнутой или прямой формы (рис. 134 и 138). Концы рычага подвешены с помощью подвески к промежуточному рычагу, при помощи которого усилия обоих рычагов передаются совместно измеритель-



Рис. 133. Наименование призмных опор.

ному органу. Упор моста на рычаг указан посредством стрелки. В действительности платформа устанавливается на призмных подвесах, которые со своей стороны подвешены к одноплечему рычагу, так что даже незначительные дуговые перемещения точки опоры выравниваются. Впрочем, платформа, естественно, должна быть подперта больше чем в двух точках, поэтому главный рычаг

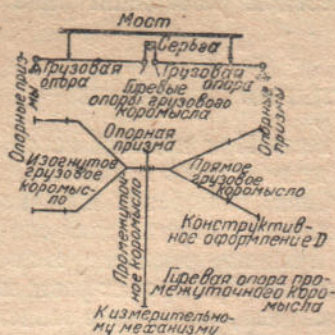


Рис. 134.

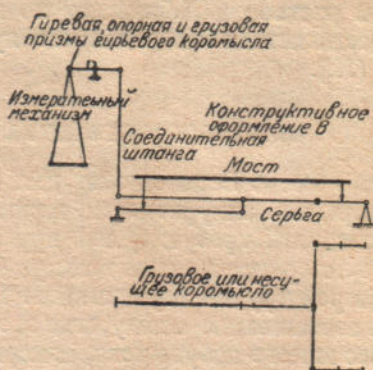


Рис. 135.



Рис. 136.

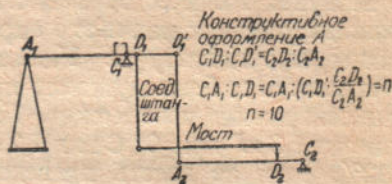


Рис. 137.

Рис. 134—137. Мостовые весы разных конструкций.

раздваивается (рис. 134—135), но в дальнейших схемах это не обозначено, Раздвоение с короткими опорными призмами конструктивно заменяет сквозные опоры, могущие во всяком случае препятствовать боковому опрокидыванию платформы. Если для одноплечего рычага выбирается передача 10 и столько же для поперечного, то получается общая 100-кратная передача и с равноплечим рычагом; в качестве такого измерительного прибора получается конструкция сотенных весов (рис. 134).

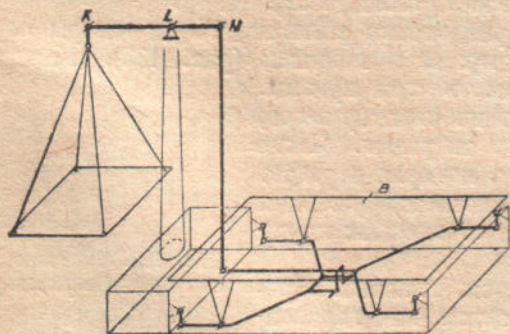


Рис. 138. Мостовые весы конструкции В как десятичные весы.

Как измерительный прибор, служит преимущественно коромысло с передвижным грузом. Для малых весов один из одноплечих рычагов удлиняют и на него опирается другой рычаг. Такую конструкцию представляют мостовые весы конструкции В (рис. 135, 138); они, как десятичные весы, часто имеют в рабочем коромысле отношение 1 : 5, а в измерительном рычаге — 1 : 2, если, конечно, не применяют измерение передвижным грузом (рис. 139 и 140).

Для весов указанных типов требуется 4 или 3 опорных точки (рядом

расположенные призмные опоры, как нами выше было сказано, мы рассматриваем как одну длинную опору), что ставит определенные требования к устойчивости станины весов. Поэтому не случайно, что раньше предпочитали конструкции весов, требовавшие только две точки опоры. На рис. 136 левый удлиненный рычаг служит одновременно и измерительным рычагом; при высоко подпертом измерительном рычаге получается конструкция А страсбургских

платформенных весов (рис. 137), мало применяемая для современных стальных весов. Во всех конструкциях мостовых весов, как измерительную часть применяют рейки с передвижным грузом. Деление балок производится на делительных машинах, поэтому применением последних можно достигнуть требуемой для технических целей точности весов с передвижным грузом. Эта точность

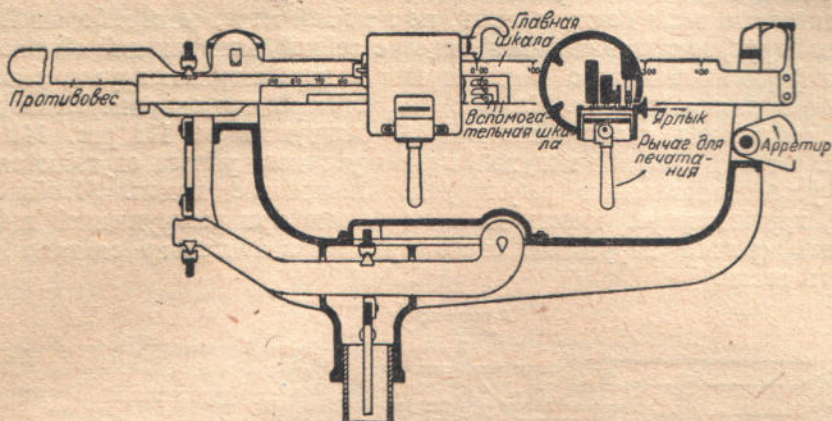


Рис. 139. Механизм передвижного груза с приспособлением для печатания, $\frac{1}{8}$ натур. величины, фирмы «Гарвенсверке».

предписана правилами проверки, поэтому клеймо поверочного учреждения ставится только тогда, когда мостовые весы проверены уравниванием путем накладывания гирь или передвижной гирей, причем погрешность при максимальной нагрузке не должна превышать 0,6 г на 1 кг. При $\frac{1}{10}$ максимального груза на весах допустимая абсолютная погрешность должна равняться $\frac{1}{5}$ погрешности при максимальном грузе, т. е. эта погрешность должна составлять 0,12 г на килограмм груза.

Обычные конструктивные оформления реек для подвижной гири показаны на рис. 139, 140, где можно также рассмотреть обычные конструкции подушек и призмённых опор. Арретир, удерживаемый винтом, предохраняет призму от повреждений при транспортировке весов. На весах (рис. 139) имеется только главная передвижная гиря, на которой передвигаются передвижные вспомогательные шкалы, показывающие подразделения главных делений. Таким образом, весь механизм передвижного груза составляет единое замкнутое целое. Это устройство можно снабдить также механизмом для печатания картонных ярлыков, как это видно из рис. 139. Нижняя поверхность балки и вспомогательных шкал находится в одной плоскости. В соответствующих местах на них выгравированы цифровые обозначения, каковые можно отпечатать, прижимая к ним, посредством нажимного рычага и эксцентрикового устройства, вдвинутую ленту мягкого картона. Во избежание ошибки при печатании ярлыков придуманы и испытаны многочисленные приспособления, так как часто эти печатные ярлыки служат оправдательным расчетным документом. Так, например, тормозы движения не позволяют печатать, когда не все шкалы установлены на полные числа. Следует также исключить возможность печатания иначе, как при положении равновесия рычага. Для этого весь рычажный механизм помещается в закрытую коробку. Передвижной груз приводится в движение снаружи, посредством соответствующей передачи. Вставить в зарубку пригнанный стержень и тем освободить движение печатного механизма можно лишь тогда, когда весы

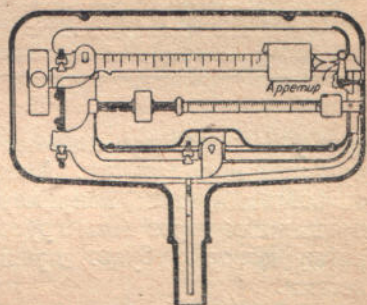


Рис. 140. Механизм передвижного груза без приспособления для печатания, германской фирмы «Гарвенсверке».

приходят в состояние равновесия. Однако, для того, чтобы зубчатая передача, а также ввод карточек, не могли вызвать в балке ошибочных показаний, все эти части расположены по оси соприкосновения призмы и опор балки с подвижным грузом. Где печатанию не придают значения, лучше выбрать более удобную для обслуживания конструкцию, изображенную на рис. 140, здесь добавочная шкала помещена на особой рейке ниже главной.

Десятичные веса должны иметь, по крайней мере, один небольшой вспомогательный груз, передвигающийся рядом с рейкой, измеряющий обычно до 5 кг.

Платформенные весы с чашками или с передвижным грузом снабжаются устройством для разгрузки. На рис. 139, 140 средняя опорная балка для разгрузки опускается и тогда все призмы разгружаются. На рис. 141 разгружающий рычаг и опорная подушка промежуточного рычага опускаются и платформа устанавливается в регулируемое положение покоя. Чтобы сберечь призмы, грузы следует класть на весы только при разгруженной платформе. Даже однократное нарушение этого правила значительно снижает чувствительность весов.

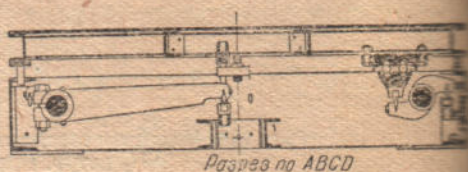
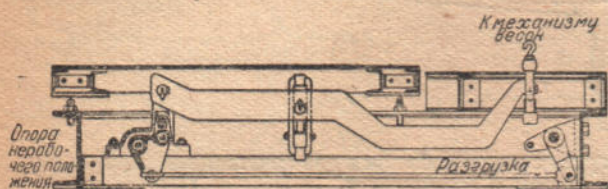
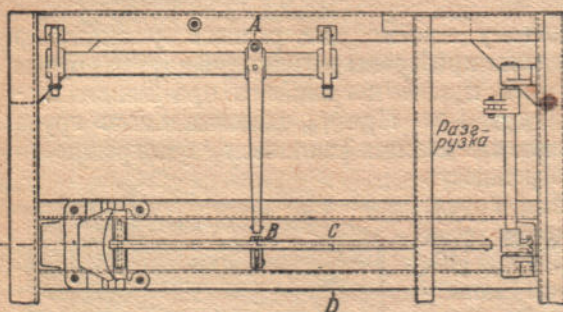


Рис. 141—142. Нижняя часть мостовых весов новейшей конструкции для предельной нагрузки в 500 кг, $\frac{1}{20}$ натур. величины, фирмы «Шенк».



Чтобы привести весы в рабочее положение, необходимо приподнять весь груз хотя бы на несколько миллиметров. При больших грузах для этого требуется ручное либо механическое подъемное устройство, при проектировании которого следует учесть, что при подъеме груза оно должно произвести и передать определенную заданную работу. Аналогичные и некоторые другие механические приспособления, как например, приборы для автоматической регистрации всех прошедших через весы грузов, превращают современные весы в сложные аппараты, которые будет правильнее называть «взвешивающей машиной», чем весами.

§ 58. Юстировка и проверка весов. Вновь изготовленные фабрикой весы или весы, подвергавшиеся ремонту, должны быть отрегулированы и проверены. Эта проверка должна установить, соответствуют ли весы предъявляемым к ним техническим условиям. Выверенные государственным учреждением (Институтом метрологии) весы снабжаются клеймом. Регулировкой весов, еще не удовлетворяющих соответствующим требованиям, достигается их правильное показание в желаемых пределах. Допустимая погрешность (для платформенных весов с грузовым разновесом или передвижным грузом) — 1,2 г/кг при максимальной нагрузке и $\frac{1}{5}$ от этого при $\frac{1}{10}$ этой нагрузки. Если положить на платформу измеряемый груз, соответствующий показанию передвижного груза или весу, показанному чашечными весами, то прибавка или отнятие указанных дробных частей измеряемого груза должны вывести весы из положения равновесия (испытание точности). Если весы приведены в равновесие, то указанный положительный или отрицательный «привесок» должен дать определенное отклонение весов (испытание чувствительности, Л.).

§ 59. Теория весов. (Л.). На коромысле весов, будет ли это несущее коромысло или измерительный рычаг сложных весов, приблизительно на одной

прямой расположены три призмы. По отношению к опорной призме, как точке вращения, действуют — груз, уравнивающие и измеряющие его гири и собственный вес коромысла, величиной L , G и B , соответственно на плечи l , g и b , под углами λ , γ и β ; последние отсчитываются в положении равновесия рычага от вертикальной прямой таким образом, что при повороте в положительном направлении на угол φ , углы λ и γ возрастают, а угол β убывает. Тогда для положения равновесия получается (рис. 143).

$$L \cdot l \cdot \sin \lambda + B \cdot b \cdot \sin \beta = G g \sin \gamma. \quad (1)$$

Закону рычага подчиняются проекции плеч рычага на горизонтальную прямую.

Если к грузу L прибавить добавочный груз dL , то углы λ , β и γ изменятся на одно и то же значение $d\varphi$ и для нового положения равновесия будет

$$(L + dL) l \cdot \sin (\lambda + d\varphi) + B b \sin (\beta + d\varphi) = G \cdot g \cdot \sin (\gamma + d\varphi). \quad (2)$$

Если подставить выражения для суммы синусов, вычесть уравнение (1), вычеркнуть бесконечно малые второго порядка и подставить вместо $\sin d\varphi$ его угол $d\varphi$, а вместо $\cos d\varphi$ единицу, то получится

$$\frac{dL \cdot l \cdot \sin \lambda}{d\varphi} = -Ll \cos \lambda - Bb \cos \beta - G \cdot g \cos \gamma. \quad (3)$$

Таким образом, добавочный момент $dL \cdot l \cdot \sin \lambda$ вызывает отклонение $d\varphi$, зависящее от проекций плеч рычага на вертикальную прямую; коромысло весов можно рассматривать (в отношении отклонений), как своеобразного устройства очень короткий, но широкий маятник, составленный собственно из трех маятников; один из них, например, имеет длину $g \cos \gamma$ и вес G , сосредоточенный ниже s . При этом действие трех отдельных маятников суммируется алгебраически таким образом, что плечо результирующего маятника направлено или вниз — тогда положение коромысла устойчивое; или вверх — тогда рычаг неустойчив и переворачивается от произвольно малого груза; если, наконец, правая часть уравнения (3) равна нулю, тогда равновесие рычага будет безразличным. Чем больше мы приближаемся к такому состоянию безразличия, тем чувствительнее реагирует рычаг весов на всякую одностороннюю перегрузку, и потому называют



Рис. 143. Схема действия сил на коромысло весов.

$d\varphi/dL$ — чувствительностью весов,

$dL/d\varphi$ — их нечувствительностью = U .

Последнее выражение употребительнее, и нечувствительность определяют, добавляя на чашку весов добавочный груз и замечая, сколько надо прибавить, чтобы получить некоторое определенное отклонение, мерой которого чаще всего выбирают отклонение стрелки на 1 мм. Обозначение $dL/d\varphi$ как инертности весьма употребительно (в Германии), но в математическом смысле неправильно, так как инерция означает сопротивление ускорению.

Чтобы сделать весы высокочувствительными и устойчивыми, результирующий маятник должен быть направлен вниз, но быть коротким. Это должно соблюдаться не только тогда, когда при ненагруженных весах собственный вес грузовой платформы L_0 и чашки для гирь G_0 взаимно уравниваются, но и в нагруженном состоянии, когда с обеих сторон действуют грузы $L_0 + L$ и $G_0 + G$. Для этого необходимо, чтобы длина результирующего маятника была независима от нагрузки L ; такая чувствительность может быть достигнута тогда, когда все лезвия призм лежат на одной прямой и только центр тяжести коромысла имеет соответственное положение немного ниже S . Так как в уравнении (3) средний член справа не зависит от нагрузки, а оба крайние ей пропорциональны, то, при меняющейся нагрузке, когда опоры лежат на одной прямой, $U = C_0$, если нет, то $U = C_0 + C_1 L$.

Прогиб коромысла под действием грузов L и G пропорционален (приблизительно) их величине; поэтому величины $G \cdot g \cdot \cos \gamma$ и $L \cdot l \cos \lambda$, представляющие доли участия этих отдельных маятников в результирующем маятнике, изменяются пропорционально квадрату G или L . Поэтому чувствительность никак не может всегда оставаться одинаковой, так как подобные деформации

весьма сильно влияют на результирующий маятник, который сам по себе является коротким. Можно создать некоторое выравнивание, если в ненагруженном состоянии (т. е. когда коромысло нагружено только весом некоторых частей самих весов) несущие призмы поставить несколько выше опорной, углы γ и λ будут меньше 90° и центр тяжести коромысла будет лежать достаточно низко. При наложении груза и гирь крайние опоры переходят через среднее положение, поэтому влияние собственного веса коромысла уменьшается, так что не получается слишком большой длины результирующего маятника.

Как результат этих соотношений, нечувствительность при изменяющейся нагрузке выражается уравнением

$$U = C_0 + C_1 L + C_2 L', \quad (4)$$

где C_1 будет отрицательным, а C_2 всегда положительным, и если определить опытным путем нечувствительности U_0 , U_1 и U_2 , которые соответствуют грузам 0, L_1 и L_2 , то три постоянные чувствительности весов будут:



Рис. 144. Влияние прогиба коромысла на чувствительность.

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= U \\ C_1 &= \frac{L_2^2(U_1 - U_0) - L_1^2(U_2 - U_0)}{L_1 L_2 (L_2 - L_1)} \\ C_2 &= \frac{L_1(U_2 - U_0) - L_2(U_1 - U_0)}{L_1 L_2 (L_2 - L_1)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Рис. 144 дает в виде примера ход кривой нечувствительности для простых равноплечих весов в 100 кг максимальной нагрузки: их нечувствительность значительно меньше, чем у платформенных весов с их многочисленными опорами, для которых допустимая погрешность при наивысшей нагрузке в 100 кг составляет 60 г и при нагрузке в 10 кг — 12 г. Однако, можно достигнуть очень хорошей чувствительности при всех нагрузках, несколько загибая линию опор кверху и представляя ей возможность выпрямляться от прогиба коромысла.

Вышеприведенные формулы непосредственно относятся к единичному коромыслу весов; но они сохраняют свое значение и для целых сложных весов, свойства которых слагаются из свойств их частей в известном смысле аддитивно. Поэтому, конечно, влияние измерительного или гиревого коромысла, как совершающего наибольшие движения, является перевешивающим. Пусть U_0 и U_1 будут нечувствительности обоих отдельных весов, именно гиревого и грузового коромыслов десятичных весов, которые можно себе представить отделенными друг от друга, если разрезать соединительную или тяговую штангу; $h_1 > 1$ — будет отношение плеч рычага в грузовой части, $m < 1$ отношение размахов обоих коромысел, являющееся также отношением их длин до точек укрепления соединительной штанги; тогда общая нечувствительность весов в целом будет

$$U = h_1 U_0 + m U_1. \quad (6)$$

На рис. 136 (в миллиметрах, взятых по чертежу) $h_1 = 48,5 : 8,2 = 5,9$; $h_0 = 17 : 10 = 1,7$; отсюда, конечно, получается $5,9 \cdot 1,7 = 10$ (десятичные веса); далее $m = 10 : 48,5 = 0,206$, следовательно $U = 5,9 U_0 + 0,206 U_1$; если $U_0 = U_1$, то доля участия грузовой части в общей чувствительности составляет только 3,4%. Практически стараются, по возможности, сделать $U_1 = 0$, располагая у грузового коромысла опорные призмы и центр тяжести в одной плоскости; равновесие коромысла становится тогда безразличным, что, вследствие прогиба, достижимо в точности не при всех нагрузках. Чувствительность весов регулируется тогда на измерительном коромысле, которое и доводят до подходящего состояния чувствительности.

Как это должно быть при измерительном коромысле, снабженном гиревой чашкой, ясно из сказанного выше и выраженного в виде формул. Относительно коромысла с подвижным грузом можно прибавить еще следующее. Для действия

подвижного груза определяющей является не та шкала, которая употребляется для установки груза и отсчета, но идущая подобно ей воображаемая шкала, по которой устанавливается в соответствующий момент центр тяжести подвижного груза. Этот центр тяжести и определяет по рис. 145, согласно формуле (1), соответственный угол γ и длину рычага g , тогда как G является постоянным. Коромысло же подвижного груза, включая и необходимый в большинстве случаев противовес с грузовой стороны, определяет значения B , b и β , имеющие здесь значительное влияние на общий результат. Если нечувствительность весов всегда должна быть почти одна и та же, то центр тяжести подвижного груза должен перемещаться по прямой, параллельной линии, соединяющей ребра обеих призм. Тогда, хотя $\cos \gamma$ и меняется при передвижении груза, но $g \cos \gamma$ остается постоянным и неизменяющееся значение $G \cdot g \cdot \cos \gamma$ может быть уравновешено соответственным изменением положения центра тяжести коромысла. Таким образом это условие при коромысле с передвижным грузом эквивалентно требованию при обыкновенных весах, чтобы ребра всех трех призм лежали в одной плоскости. Возможно, хотя и не представляет никаких преимуществ сделать отрезок $g \cos \gamma$ равным нулю. Можно также принять в расчет прогиб коромысла и дать ему в ненагруженном состоянии легкий загиб вверх. Подшлифовкой в необходимых случаях призм можно достигнуть только противоположного, именно уменьшить превышение.

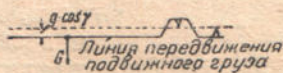


Рис. 145. Действие подвижного груза.



Рис. 146. Влияние прогиба коромысла на отношение плеч.

Солидная и прочная конструкция всех подверженных деформациям частей весов имеет важное значение для их постоянной чувствительности во всех областях измерения. Эти деформации могут также отражаться и на правильности показаний всей области измерения. Если ребра призм не лежат в нейтральной плоскости коромысла весов, то при изгибе коромысла, согласно рис. 144, изменяется и соотношение плеч. Это влияние отпадает, если опоры лежат в нейтральной плоскости, поэтому возможно посредством высоты призм влиять на изменения соотношения плеч и сделать их полезными для юстировки весов.

Если, прежде всего, неточны отношения плеч рычага, то получается юстировочная погрешность коромысла, которая пропорциональна нагрузке. Если устанавливать на гиревой чашке или на коромысле подвижного груза различные значения грузов, то величины L_s груза, приложенные к другому концу коромысла, должны привести к равновесию. В действительности необходимо добавить некоторый довесок на юстировочную погрешность $Z_a = \alpha L$, пропорциональный нагрузке, чтобы достигнуть равновесия. Уравнение истинных величин для жесткого коромысла будет $L = L_s + \alpha L$.

Погрешность прогиба входит пропорционально квадрату нагрузки и для ее уравновешения необходима поправка на прогиб $Z_b = \beta L^2$, в общем получается

$$L = L_s + Z_a + Z_b = L_s + \alpha L + \beta L^2. \quad (7)$$

Вместе с должным весом, отвечающим поставленным гилям, необходимо на грузовую чашку весов поставить и оба довеска, чтобы установить равновесие. Отсюда получается, что если при двукоромысловых весах отметить обе постоянные для обоих коромысел [индексами] 1 и 2, их уравнение должной величины будет

$$L = L_s + [(\alpha_1 + \alpha_2) + 2(\beta_1 + \beta_2)L_0] L + (\beta_1 + \beta_2)L^2, \quad (8)$$

где L_0 — собственный вес грузовой чашки; или для весов в целом можно написать:

$$L = L_s + (\alpha + 2\beta L_0) L + \beta L^2, \quad (9)$$

где α и β — постоянные весов, полученные суммарно из постоянных обоих коромысел. Предполагается, что груз находится посредине платформы или, лучше всего, равномерно распределен по ней, иначе в уравнение входят еще правильные

доби U и v , которые при эксцентрически расположенном грузе определяют влияние распределения груза на опоры.

Погрешности $L-L_s$ так же, как и чувствительность, изменяются согласно квадратному уравнению, и опять квадратичный член происходит от прогиба коромысла. Уравнению погрешностей $L-L_s$ придают вид, приблизительно, по фиг. 147, чтобы распределить погрешность, по возможности, по всему ходу кривой; для этого β должна быть отрицательной.

Если задачей является удовлетворить условиям поверки, то приходится беспокоиться только о поведении весов при полной нагрузке и при одной десятой ее, при которых погрешность может быть $0,6\%$ и $0,12\%$; кроме того, весы естественно должны устанавливаться на нуль. Допустимые поверочные погрешности проставлены на рис. 147. Весы с погрешностями по рис. 147, следовательно, еще не удовлетворяют условиям поверочных испытаний, но они выверены целесообразно, именно концентрически, другими словами, выверка оставляет весы в одной точке с положительной, в другой с отрицательной погрешностью, — обе одного порядка величины; таким образом, если погрешность будет еще уменьшена, она с возможно большей вероятностью уложится в предельные погрешности, притом в обеих точках почти одновременно. Теоретически получается, что при концентрической выверке, показания являются свободными от ошибок при нулевой нагрузке и при $0,7$ полной. Поэтому с точки зрения выверочной техники, наилучшая выверка получается тогда, когда весы делают свободными от ошибок, как при нулевой нагрузке, так и при $0,7$ полной нагрузке.

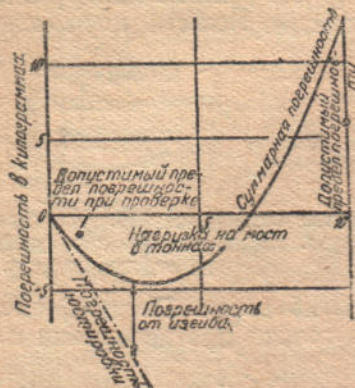


Рис. 147. Кривая погрешностей 10-тонных мостовых весов.

получается тогда, когда весы делают свободными от ошибок, как при нулевой нагрузке, так и при $0,7$ полной нагрузке.

§ 60. Выверка коромысловых весов. Чтобы определить погрешность весов, необходимо иметь набор нормальных выверенных гирь, в сумме равных наибольшей нагрузке; при больших нагрузках очень часто этого не имеется. Если имеется в распоряжении только часть L_n/L_m наибольшей нагрузки в виде нормальных гирь, например, 1 т нормальных гирь для 10-тонных весов, то при их помощи можно отвесить столько вспомогательных грузов, что в сумме они дадут наибольшую нагрузку. Для этого используют те же, подлежащие испытанию весы с помощью искусственного приема, уравновешивая нормальный вес, затем снимая его и заменяя вспомогательным грузом; необходимо только точно установить гиревое коромысло. Проще воспользоваться параболическим законом, определяя погрешность весов (необходимые довески) от нуля до L_n/L_m и от L_m-L_n/L_m до L_m . Если они будут Z_1 и Z_2 , то добавочный вес при наибольшей нагрузке составит

$$Z_m = \frac{L_m}{L_n} \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{2}. \quad (10)$$

Во всяком случае, погрешность в определении значений Z_1 и Z_2 здесь увеличивается в L_m/L_n раз, другими словами, при определении погрешности на этих участках должна быть достигнута точность в L_m/L_n раз большая, чем окончательно требуемая для Z_m .

После того, как подобного рода наблюдениями мы сделали обзор и получили понятие об особенностях каких-нибудь весов, теперь задача — отрегулировать их так, чтобы они удовлетворяли правилам поверки или в данном случае нашим собственным требованиям. Это и есть выверка весов. Припомним, что поверочная ошибка означает от природы неправильное отношение плеч коромысла, и эта ошибка (измеренная в килограммах) пропорциональна нагрузке, тогда как погрешность прогиба проистекает из того, что при прогибе коромысла отношение плеч *изменяется* и погрешность прогиба зависит от квадрата нагрузки. Если изменить поверочную ошибку, то кривая погрешностей (рис. 147) повернется около нулевой точки, не изменяя своей кривизны. Если изменить

погрешность прогиба, то кривая вытягивается, но угол, под которым она отходит от нуля, остается неизменным. Если же кривая погрешностей, как на рис. 147, не удовлетворяет требованиям правил поверки, то необходимо исправить обе погрешности.

На погрешность прогиба лучше всего воздействовать изменением высоты опорных призм, заменяя призму, которая расположена выше нейтральной линии (в смысле теории упругости), другой более короткой, и наоборот. Лучше всего изменять гиревую призму грузового коромысла (с которой всегда будем иметь дело), и даже простое рассмотрение рис. 146 показывает, что гиревую призму нужно укоротить, если $Z_2 - Z_1$ было положительным. Можно поставить любую другую призму, повторить испытание и рассчитать правильную высоту призмы на основании правила пропорциональности.

Когда таким образом кривая погрешностей (рис. 147) сделана более пологой, то кривую поворачивают вокруг нулевой точки путем односторонней подшлифовки одной из призм. Это следует делать на грузовой призме гиревого коромысла, потому что здесь можно обойтись наименьшей подшлифовкой. Неудобно то, что нет никакого масштаба, чтобы судить, насколько далеко подвинулась работа. Поэтому при весах с подвижным грузом лучше юстировать путем изменения подвижного груза.

Увеличение веса подвижного груза, который уравнивается в нулевом положении тарированием, позволяет затем подвижному грузу, при передвижениях по длине шкалы, уравнивать большие нагрузки, чем раньше, т. е. юстировка будет изменена. Для этого в отверстие, высверленное в подвижном грузе, заголяют точно пригнанные и поэтому плотно сидящие куски свинца, на который ставится поверочное клеймо. Требуемое увеличение веса, естественно, распределяется на главный и вспомогательный груз, притом так, чтобы момент (груз умножается на длину шкалы), остался пропорциональным делениям шкалы. При этом, конечно, предполагается, что при весах с подвижным грузом, их устройство подвижного груза само по себе находится в порядке. Для этого должны быть выполнены, каждое в *отдельности*, три следующие условия: подвижный груз (включая и вспомогательный груз) должен непосредственно уравнивать натяжение, вызванное в соединительной штанге наибольшей нагрузкой; общий груз должен быть правильно распределен между главным и вспомогательным грузом; если этого нет, оба условия должны быть улучшены, как описано выше. Сверх того, деление и насечка рычага подвижного груза должны быть правильными. Это требование имеет совершенно другой характер, чем все прочие, так как здесь вопрос не идет о каком-нибудь закономерном изменении делений вдоль шкалы, но каждая отдельная зарубка может быть правильной или неверной и должна быть отдельно проверена, а в случае нужды и подогнана. Для того, чтобы производить это фабричным способом в больших размерах, приходится придумывать ряд специальных приспособлений для ускорения работы. Правильность делений в отношении длины проверяют, протягивая стальную проволоку от подвижного груза к колесу со шкалой, укрепленному на конце коромысла, которое этой проволокой приводится во вращение. Особые вспомогательные приспособления облегчают разделение общей длины на 99 частей. Именно своеобразным требованием поверочных предписаний является то, что при 100 кг весах общая сумма показаний главной и вспомогательной шкалы обязательно должна быть равна 100 кг, откуда следует, что главная шкала должна иметь 99 делений, первая вспомогательная — 9 и только последняя вспомогательная шкала может иметь десять делений. По сравнению с естественно напрашивающимся распределением шкал $100 + 1 + 0,1$, в сумме 101,1, это предписание может иметь только формальное преимущество, зато оно имеет недостаток в виде неудобства выверки, а при отвешивании ровно 100 кг связано даже с весьма большим недостатком, потому что не видно, сколько же нужно снять лишнего груза; таким образом для отвешивания 100 кг так называемые 100-кг веса являются непригодными.

Возвращаясь к поверке делений коромысла, можно указать другой способ, — путем взвешивания. Подвешивают чашку с гирями на грузовом конце коромысла и уравнивают ее при положении подвижного груза на каждой

зарубке. Еще лучше посадить ее на специальный выверочный мостик. Так как каждому делению шкалы отвечает какой-нибудь круглый вес, рекомендуется выбор какой-нибудь определенной длины коромысла до вспомогательной чашки, что может быть облегчено специальным приспособлением, вроде вспомогательной призмы с микрометренным передвижением. Установка последней на длинном конце коромысла и производство вывески в обратном направлении, путем увеличения противовеса, имеет многие преимущества.

§ 61. Маятниковые весы. Как известно (§ 11), вообще нулевыми методами можно достигнуть наибольшей точности, однако с методами прямого отсчета можно работать много быстрее, если не требуется достижения наивысшей точности. Маятниковые же весы позволяют достигать весьма удовлетворительной для многих целей точности.

Они состоят из (уже описанного механизма) мостовых весов, в который только включено другое измерительное устройство. Это устройство имеет маятниковый груз, центр тяжести которого подымается под действием поставленного на платформу моста груза таким образом, что равновесие наступает при одном определенном положении маятника. Это положение указывается стрелкой, движущейся перед разделенной шкалой.

В конструктивном отношении принципиальным отличием описанных весов по сравнению с обыкновенными весами является то, что измерение на них совершается не всегда при среднем положении, но обыкновенно при косо стоящих опорных призмах. Призмы моста в большинстве случаев стоят не очень косо, но опорная призма маятника совершает движения, примерно, до 50° , т. е. она при наибольшей нагрузке наклонена на 25° в одну и при ненагруженной — на 25° в другую сторону. Поэтому грузовое коромысло измерительного механизма испытывает заметные перекосы (около $\pm 25^\circ$ от горизонтали); это обуславливает неравномерность шкалы и если, например, тяговая штанга достаточно длинна, чтобы следать нечувствительным ее собственную косую установку. Эта неравномерность для $\pm 25^\circ$ наклона грузового коромысла выражается следующим образом.

Равномерно разделенная длина шкалы	0	25	26,23	50	73,77	75	100
Угол (в градусах)	0	11,875	12,5	25	37,5	38,125	50
Правильно разделенная шкала	0	23,75	25	50	75	76,25	100

Более короткая тяговая штанга вызывает некоторое изменение этих чисел. Неравномерность шкалы едва ли может вызвать ее удорожание в массовом производстве. Можно, однако, достигнуть равномерного деления шкалы,

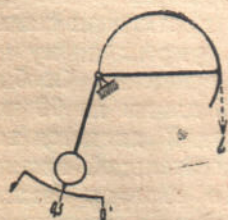


Рис. 148. Маятниковые весы с почти равномерной шкалой.

если заменить тяговую штангу *стальной лентой*, огибающей профильную шайбу, связанную с маятником и указателем, которая в данном случае заменяет подвес на призме. Необходимо только эту шайбу очертить по соответствующей, определенной расчетом кривой. Можно получить, приблизительно, равномерную шкалу, если за такую кривую взять полукруглость, построенную на грузовом плече, как на диаметре (рис. 148). Однако, при этом касательная к кривой перемещается в горизонтальном направлении, отчего возникают отклонения стальной ленты и боковые усилия мостового коромысла и у несущей призмы маятникового груза коромысла. Первое можно устранить, делая устройство маятникового груза, попарно симметричным, так что нагрузка от моста воспринимается сперва уравнивающим коромыслом. Наилучшим же решением будет,

если и несущую призму заменить ленточным подвесом и кривой, как у весов на рис. 149. Диль показал, что в этом случае распределение усилий происходит свободно без вредных напряжений и *наилучшее* решение получается при выполнении следующих условий: дуга циклоиды, которую в этом случае образует

шкала, должна мало отличаться от дуги круга; оба конца шкалы должны лежать на одинаковой высоте, равномерно разделенная шкала должна иметь возможно малые ошибки; профильные шайбы для поддерживающей и грузовой стальных лент должны очерчиваться дугами круга. Эти условия однозначно определяют взаимное положение обеих дуг круга, положение по отношению к ним центра тяжести груза и величину парового маятникового груза, по отношению к грузовому усилию.

§ 62. Измерение и взвешивание жидкостей. Жидкости и сыпучие тела взвешивают, применяя стоящие на весах баки. Вес такого бака называется *тарой*, вес жидкости, включая сосуд, называется весом *брутто* и вес одной жидкости весом *нетто*. Если желательнее определить вес нетто, его находят как разницу: брутто минус тара. Тара должна быть, по возможности, малой, иначе взвешивание превращается в дифференциальный метод и оно становится менее точным.

Жидкости часто измеряют наполнением *калиброванных сосудов*. Сосуд имеет шкалу, по которой можно отсчитать любое количество жидкости (мензурки) или имеет особую отметку, до которой сосуд вмещает определенное количество жидкостей. Это количество точно определяется опытом, оно может и не быть каким-либо круглым числом. Шкала на сосуде редко дает удовлетворительные измерения, если поверхность жидкости относительно велика, так что небольшая ошибка в отсчете приобретает большое значение. При сосудах с одной чертой или с двумя чертами, между которыми должен лежать определенный объем, влияние малой разницы уровней при измерении можно ослабить путем сужения сосуда вблизи отметок (рис. 154). Если при измерении сосуд наполняется до краев, могут создаться затруднения в отсчете из-за образования мениска, который может быть различной высоты.

Также важна и точность опорожнения сосуда. Для этого заставляют сток действовать как сифон, так что он сразу обрывается, как только в него попадает воздух (рис. 152). При таком устройстве, в самый момент обрыва струи еще остается некоторая конечная высота истечения — высота h_0 . Поэтому не приходится долго ждать, пока вытекут последние капли. Для правильной установки мерного сосуда предусматривается площадка для ватерпаса, дно сосуда должно иметь уклон к крану, а еще лучше углубление меньшего сечения (Л.).

Измерение зависит от *температуры*; так как с температурой расширяется как жидкость, так и сосуд, то результирующее влияние температуры должно быть найдено путем опыта. Поэтому выверка должна производиться или для целого ряда температур, или же для температуры постоянного употребления.

Проверка чаще производится так, что сосуд наполняют до отметки и воду взвешивают. Если хотят предпринять калибровку по объему, то необходимо, при горячей воде, принять во внимание расширение ее от нагревания.

Если, например, требуется прокалибровать сосуд при 50° и путем взвешивания найдено, что сосуд вмещает 734 кг воды, то его емкость, согласно таблицы 5, будет

будет $\frac{734}{0,988} = 743$ л. Такой сосуд следует снабдить надписью «0,743 м³ при 50° » или «734 кг воды при 50° »; неправильна была бы надпись «0,734 м³».

Для очень больших сосудов надежным способом калибровки будет добавка определенного количества легко определяемого химического вещества и определение его концентрации после *основательного* перемешивания (Л.). Для

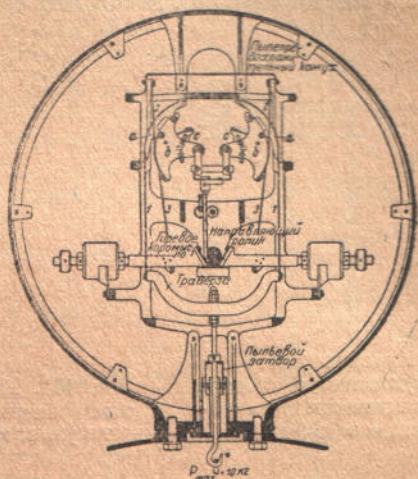


Рис. 149. Маятниковые весы с ленточным подвесом взамен опор на призмы, $\frac{1}{8}$ натур. величины, фирмы «Таховерке».

1, 2, 3 — стальные ленты, огибающие дуги а, б, с.

этого можно применить гипосульфит, который определяется титрованием иодным раствором. Можно также пользоваться флюоресцеином или эозином, определяя их колориметрически (сравните стр. 134).

§ 63. Длительные измерения. Для измерения количеств длительно протекающей жидкости путем взвешивания можно воспользоваться двумя сосудами одинаковой или различной вместимости, поставленными на весы и в которые попеременно направляется жидкость. Конец подводящего трубопровода устроен

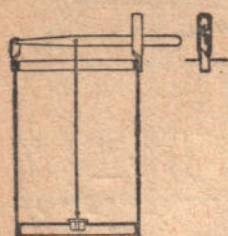


Рис. 150. Сосуд с выпускным вентиляем и с пружинящим запорным рычагом для взвешивания жидкостей.

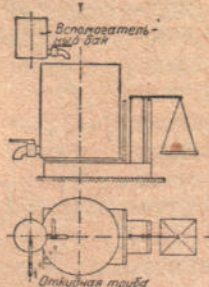


Рис. 151. Устройство для взвешивания длительно текущих жидкостей.

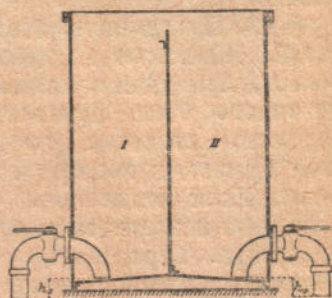


Рис. 152. Калиброванный двойной сосуд с сифонным стоком.

поворотным, чтобы можно было попеременно наполнять эти сосуды. Внизу сосуда устроен вентиль или кран, через который можно спускать жидкость по окончании взвешивания. Чем быстрее стекает жидкость, тем для больших количеств годится устройство, поэтому спускное отверстие следует делать побольше. Если оно недостаточно, то увеличение длины трубы вносит улучшение (рис. 152, высота h_0). Целесообразен изображенный на рис. 150 сосуд, ибо его запорный рычаг пружинит и тем обеспечивается плотное закрывание вентиля.

Если имеется один большой и один малый сосуд и двое соответствующих весов, то для измерения используется большой сосуд, а малый служит для приема жидкости лишь в то время, которое употребляется на взвешивание и опорожнение большого сосуда. Достаточно иметь на весах один большой сосуд, а малый, вспомогательный, поставить выше его, и по мере надобности опорожнять в главный (рис. 151). Во время взвешивания большого сосуда воду принимают во вспомогательный; по опорожнении главного, содержимое вспомогательного опускается в главный сосуд и взвешивается со следующей порцией. Обратный порядок операций применяется для питания паровых котлов: на весах стоит верхний из двух сосудов, взвешенное количество воды спускается в нижний запасный приемник, из которого питательный насос и качает воду по мере надобности. Вода в запасном сосуде как в начале, так и в конце всего исследования должна стоять на одной и той же высоте (по водозмерному стеклу). Устройство по рис. 151 применительно при замерах воды после использования, остальные — при замерах до использования.



Рис. 153. Измерение расхода горючего для двигателя.

При постоянно притекающих жидкостях можно организовать их замер по объему при помощи двух сосудов одинаковой или различной емкости. В случае нужды калиброван может быть только один из них. Так как не всегда случается наполнять сосуд точно до метки, то целесообразно применять разделенный пополам сосуд по рис. 152; одна из обеих половин наполняется до края более низкой средней перегородки и излишек воды сам переливается в другую, пустую половину. Тогда перебрасывают в нее подающий рукав и опорожняют первую половину через кран. Когда наполнится вторая половина, вода сама собой переливается в первую. Обе половины прокалиброваны. При употреблении подобных сосудов, обременительным часто является только то, что нельзя

отмерить любое желаемое количество, а только кратное полной емкости сосудов.

Если имеется только *один* сосуд, то можно найти выход из положения, определяя при помощи секундомера время, необходимое для того, чтобы налить определенное весовое количество воды.

В некоторых случаях можно рекомендовать применение *отрывной иглы*; это необходимо для того, чтобы можно было точно заметить, когда определенное объемное или весовое количество жидкости израсходовано или подано. Например, расход нефти дизель-мотором целесообразно определять или путем взвешивания или путем замера в открытом сверху сосуде, отводная трубка которого, после отключения нормальной подачи горючего, привинчивается к насосу, подающему горючее (рис. 153). Должно быть определено время, в течение которого будет израсходовано 1 кг или 5 кг горючего. Это будет в том случае, если это количество будет влито в сосуд и затем уровень нефти в сосуде вновь достигнет первоначального. Для наблюдения этого уровня может служить нефтемерное стекло. Однако, будет точнее, если погрузить острием в нефть проволочную иглу, укрепленную на поперечине *a* из полосового железа. Началом и концом времени испытания будут считаться моменты отрыва острия иглы от зеркала нефти; эти моменты можно наблюдать с большой точностью. Железная полоска с иглой лежит свободно на краях сосуда; приподнимая полоску, легко убедиться, скоро ли можно ожидать отрыва иглы от поверхности жидкости.

Удобным, но не для постоянного употребления, является пробный сосуд (рис. 154), который особенно употребителен для измерения расхода бензина двигателями внутреннего сгорания. Верхняя головная склянка и нижняя измерительная замастичены в двух металлических кронштейнах; через верхний проходит подводящая трубка, через нижний жидкость спускается. При пуске в ход сначала наполняют по стрелке *1* головную склянку, причем воздух опускается через открытый воздушный вентиль. Как скоро жидкость дойдет до плоско-сплющенного колена сифона, воздушный вентиль закрывают и в дальнейшем он остается закрытым. В следующий момент сифон перекачивает жидкость из головного сосуда в измерительный, причем воздух из измерительного сосуда по уравнивательной воздушной трубке перегоняется в головной сосуд, и сифон срывает. Измерительный сосуд наполняется выше метки m_1 , затем жидкость из него вытекает через спускную трубку. Новая жидкость поступает в головной сосуд только по мере опорожнения измерительного, так как количество воздуха в обоих сосудах в сумме остается постоянным. В измерительном сосуде уровень падает ниже метки m_2 ; через короткое время головной сосуд так наполняется, что сифон опять срабатывает, и весь процесс начинается снова. Измерительный сосуд во время понижения уровня от m_1 до m_2 не получает никакого притока бензина. Если установить при помощи секундомера время прохода через обе метки, то можно подсчитать часовой расход, так как емкость *J* между двумя метками — величина вполне определенная. Если воздушный объем не соответствует этой емкости, то границы колебаний уровня в измерительном сосуде передвигаются так, что жидкость не проходит или мимо метки m_1 или метки m_2 . Для устранения этого велосипедным насосом вгоняют через воздушный вентиль немного воздуха или во время перепуска его снизу немного выпускают через тот же вентиль наружу.

Если вопрос идет о равномерной подаче, пробный сосуд надо располагать настолько высоко, чтобы колебания уровня в сравнении с высотой подачи на него не отражались. Пробный сосуд, как и открытые измерители жидкости, нельзя оставлять без присмотра, если работают со свободным стоком; но его, подобно закрытым водомерам, можно включать в постоянный трубопровод для жидкости. Такой пробный сосуд для измерения жидкостей может быть использован

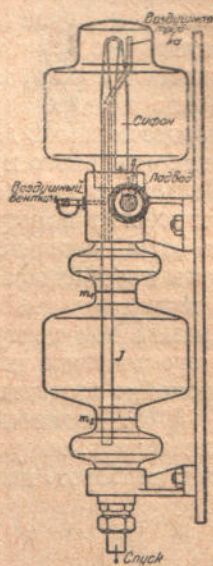


Рис. 154. Пробный сосуд. (Немецкий исследовательский институт авиации).

различными способами; его преимущество — устранение всяких механических подвижных частей.

§ 64. Измерение калиброванными сосудами как нормальный метод. Целый ряд технически применяемых методов для длительных измерений жидкостей, особенно измерения диафрагмами или дроссельными приборами (§ 71 и 79) нуждаются в нормальном методе измерения жидкостей, которым можно пользоваться, если не в каждом отдельном случае, то при первоначальном основном определении коэффициентов истечения и в аналогичных случаях. Для таких целей является наиболее надежным измерение калиброванными резервуарами.

При очень сильном потоке нельзя сделать измерительный сосуд настолько большим, чтобы его наполнение длилось достаточно долго. В этом случае отметка начала и конца времени испытания приобретает заметное значение: во-первых, включение должно происходить сразу, так как переходной момент вносит неопределенность, во-вторых, при короткой продолжительности измерения и процессы включения секундомера также приобретают значение; и, наконец, оба процесса также должны совпадать, особенно необходимо, чтобы начало и конец измерительного промежутка совпадали со серединой включения водяного потока. Поэтому в гидравлических лабораториях в качестве хорошего измерительного устройства пользуются следующим: над измерительным сосудом, поставленным на весы, находится распределительная призма, которую можно быстро передвинуть посредством шнура. В зависимости от положения призмы, вода течет или в измерительный сосуд или мимо него. Прохождение ребра распределительной призмы под центром водоподводящей трубы отмечается посредством электрического контакта на ленте хронографа по рис. 104. По окончании испытания можно спокойно взвесить сосуд и произвести измерения на ленте хронографа.

§ 65. Волюмометрическое определение количеств газа. Количество газа можно определить, выпуская газ при постоянном давлении из какого-нибудь резервуара или, наоборот, наполняя его газом и наблюдая изменение занимаемого им объема; так поступают при пользовании газометрами. Наконец, можно наблюдать изменения давления при пользовании резервуаром постоянного объема.

Газометр, который представляет открытый снизу и погруженный в воду колокол из жести, является эталонным прибором, служащим для измерения воздуха и газов, к которому в конечном счете сводятся все иные способы их измерения. Газ поступает по трубке a , и тогда колокол подымается, или выходит по той же трубке a наружу, и тогда колокол опускается. Если колокол имеет правильную цилиндрическую форму, то будет известен и объем, соответствующий каждому измеренному подъему колокола. Его можно также определить и экспериментально. Установку колокола можно отсчитать по одной, а при больших газометрах по трем шкалам, распределенным по его окружности при помощи визирного устройства (Л.).

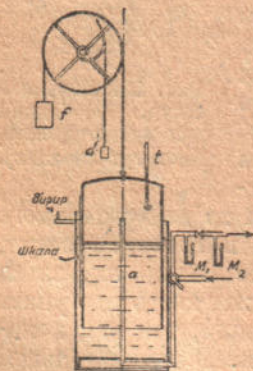


Рис. 155. Газометр.

Давление под колоколом измеряется манометром M_1 ; оно должно быть независимо от глубины погружения колокола, для чего противовес d должен действовать на переменное плечо рычага; вывод закона этого изменения дан на рис. 86. Желаемое давление может быть установлено путем добавления грузов или на колокол или к противовесу f .

Температура воды должна соответствовать температуре наружного воздуха, иначе температуру газа нельзя будет надежно определить термометром t . При больших газометрах это требование едва ли выполнимо.

Газ, при небольшом расходе, можно забирать непосредственно из-под колокола и таким образом измерять расход. Следовательно, можно, добившись предварительно установившегося хода газовой машины, в сравнительно короткое время подать газ из газометра, и вывести отсюда величину потребления газа машиной. Если имеются два газометра, то ими можно пользоваться попеременно и таким образом продолжать испытание произвольно долго. Однако, большей частью газометры служат лишь для градуировки газометров, применение

которых значительно удобнее. О таких поверочных станциях для газометров будет упомянуто дальше.

§ 66. Метод наполнения. Можно получить довольно удовлетворительную точность при измерении газов, наполняя резервуар определенной емкости и наблюдая возникающее изменение давления.

Такой метод наполнения можно, например, применить для определения подачи воздуха компрессором. Устройством изображено на рис. 156. Компрессор сжимает воздух до давления p , под которым он подается на производстве к какой-нибудь точке потребления. Воздух впускают в воздушный резервуар W известного объема V , где можно отсчитать давление p и температуру t_0 . Дроссельный вентиль x служит для того, чтобы можно было заставить компрессор работать против определенного постоянного давления p , пока давление в резервуаре подымается; для этого нужно время от времени подрегулировать вентиль x . В общем, добиться достаточно спокойного состояния манометра p можно, включая меньший воздушный резервуар между компрессором и вентилем x . Перед началом испытания и по его окончании, избыточный воздух спускается наружу через вентиль v . При производстве испытания закрывают сначала вентиль v и определяют моменты, когда манометр p_w пройдет первое деление и затем какое-нибудь другое деление. Температура T входящего воздуха определяется по термометру t .

Теория метода наполнения следующая. В элемент времени вводится подлежащий определению вес воздуха dG ; последний, соответственно своему состоянию, имеет удельный вес γ . Поступающий воздух заполняет объем, на который сокращается содержащийся в резервуаре W объем воздуха V вследствие адиабатического сжатия от начального давления p до конечного давления $p_w + dp_w$. Этот объем мы обозначим через dV . Для введенного количества воздуха имеем

$$dG = dV \cdot \gamma_1. \quad (1)$$

Для вошедшего воздуха будет

$$\gamma_1 = \frac{p_w}{RT}.$$

Для содержимого резервуара при адиабатическом сжатии получим

$$dV = \frac{V}{\gamma} \cdot \frac{dp_w}{p_w}.$$

Подставляя оба значения в (1), получаем

$$dG = \frac{V}{\gamma} \cdot \frac{1}{RT} \cdot dp_w$$

и интегрируя между моментами z_1 и z_2 , для которых отсчитаны давления p_1 и p_2 и в резервуаре заключались количества G_1 и G_2 , получаем

$$G_2 - G_1 = G = \frac{V}{R\gamma} \cdot \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp_w}{T}. \quad (2)$$

Здесь V является постоянной, равной емкости резервуара, в котором заключается все возрастающее количество воздуха. Здесь нельзя поставить $\frac{V p_w}{RT} = G$ даже в том случае, если T будет постоянной, так как относится к введенному в резервуар воздуху, а не к объему V , температура которого для нашего вывода не имеет значения, что является преимуществом ввиду трудности ее определения. Не должно быть никакого притока тепла извне, поэтому резервуар не должен, например, подвергаться прямому действию солнечных лучей.

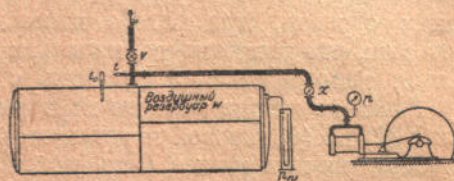


Рис. 156. Определение подачи воздуха компрессором методом наполнения.

Меняющуюся величину $\frac{1}{T}$ нужно нанести на диаграмму над соответствующими значениями p_w , после чего значение $\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp_w}{T}$ может быть найдено планиметрированием площади между ординатами p_1 и p_2 . Если же температура отсчитывается не через равные промежутки времени, но по достижении определенных интервалов давления, например, через каждые 50 мм ртутного столба, то можно просто взять среднюю из обратных значений. Если, наконец, поддерживать T постоянной, то

$$G_2 - G_1 = \frac{V}{\kappa \cdot R \cdot T} (p_2 - p_1), \quad (3)$$

для воздуха

$$\kappa \cdot R = 1,41 \cdot 29,27 = 41,3,$$

откуда

$$G = \frac{V}{41,3} \cdot \frac{p_2 - p_1}{T}. \quad (4)$$

Таким образом, при методе наполнения измеряется весовое количество воздуха или, что равнозначно, приведенный объем воздуха. Его результаты поэтому нельзя непосредственно сравнить с показаниями газовых часов.

Здесь не лишне еще раз подчеркнуть, что, благодаря применению в формулах с (2) по (4) газовой константы, давление также должно быть дано в $\text{кг}/\text{м}^2$.

Ход расчета может быть пояснен следующим примером. Показание барометра было $b = 760$ мм, начальная температура в резервуаре $t_0 = +20^\circ$.

Время по секундомеру (сек)	$z = 0$	37	65	91	116
Избыточное давление (в мм)	$p_w = \sim 0$	100	200	300	400
Температура входящего воздуха (в $^\circ\text{C}$)	$t = -$	35	37	40	42

В соответственные промежутки времени средняя абсолютная температура в месте поступления воздуха будет

$T = \sim$	307	309	312	314
------------	-----	-----	-----	-----

Емкость резервуара была $V = 20,5 \text{ м}^3$, для воздуха $\kappa = 1,41$ и $R = 29,27$.

Интервалы давления были по 100 мм Hg = 1350 $\text{кг}/\text{м}^2$, откуда $\frac{V \Delta p}{\kappa R} = 676$.

Следовательно в промежутки времени (в сек)

$\Delta z =$	37	28	26	25
--------------	----	----	----	----

были введены количества воздуха (в кг)

$G = 676 : T =$	2,20,	2,185,	2,165	2,155
-----------------	-------	--------	-------	-------

или в единицу времени подавалось (в $\text{кг}/\text{сек}$)

$G : \Delta z =$	0,0595	0,0781	0,0833	0,0862,
------------------	--------	--------	--------	---------

а выражая в приведенных объемах $\left[\text{м}^3 \left(\frac{0}{760} \right) / \text{сек} \right]$

	0,0460	0,0604	0,0643	0,066
--	--------	--------	--------	-------

Первое высокое значение для времени и отсюда низкое для количества можно отнести за счет неопределенности момента переключения вентиля с выхлопа на подачу в резервуар; поэтому первой величиной мы пренебрегаем. Из трех величин остальных получается средняя: при подъеме давления с 100 мм до 400 мм ртутного столба в резервуар было подано количество воздуха $2,185 + 2,165 + 2,155 = 6,50 \text{ кг} = 5,02 \text{ м}^3 \left(\frac{0}{760} \right)$ за промежуток времени в $116 - 37 = 79$ сек; подача компрессора, следовательно, будет $5,02 : 79 = 0,0636 \text{ м}^3 \left(\frac{0}{760} \right) / \text{сек}$.

Компрессор простого действия с ходом поршня 400 мм и диаметром цилиндра 360 мм при каждом ходе описывает объем $40,7 \text{ л} = 0,0407 \text{ м}^3$. При испытании он имел число оборотов $n = 144 \text{ об}/\text{мин}$, так как описанный в секунду объем был $0,0975 \text{ м}^3/\text{сек}$; поэтому коэффициент подачи компрессора будет $\eta = 0,0636 : 0,0975 = 0,625$.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
151	1 сн.	в метрах	в кубических метрах
179	15 сн.	но увеличивается	не увеличивается
185	16 св.	шайбе	шайбы
325	3 св.	температурой	термопарой
336	14 сн.	клин <i>e</i>	клин <i>c</i>
396	11 св.	К камере	В камере
402	9 св.	всей	своей
422	30 св.	Определение теплотворной способности тепла.	Определение теплотворной способности.

Измеренный от атмосферной линии по индикаторной диаграмме объемный коэффициент полезного действия оказался $\eta = 0,815$. Относительно понятий коэффициента подачи и объемного коэффициента полезного действия сравните § 68.

Необходимо при помощи вспомогательного исследования убедиться в плотности резервуара и всех соединений и, в случае необходимости, ввести поправку на потерю через неплотности. Само собою разумеется, что при таком испытании плотности нельзя полагаться на плотность запора вентилем, который при действительных испытаниях остается открытым; необходимо заглушить трубопровод за этим вентилем.

Описанный метод наполнения может быть обращен: чтобы определить какой-нибудь расход воздуха, можно взять потребный для этого воздух из воздушного резервуара, заблаговременно, наполненного воздухом под давлением, и наблюдать падение давления ¹.

Этот обратный метод истечения, наравне с методом наполнения, имеет тот общий недостаток, что он неприменим для непрерывного пользования. Кроме того, одновременно является меняющаяся температура в воздушном резервуаре.

§ 67. Определение количества пара по конденсату. В большинстве случаев количества пара измеряются не в виде пара, а измеряют или воду, из которой он получается, или ту воду, которая из него образуется при конденсации. Поэтому, при исследовании паровой машины или парового отопления измеряют или питательную воду, поданную в котел, или воду, выброшенную насосом конденсатора, или спущенную из конденсационного горшка.

Эту воду можно измерять или взвешиванием или по объему.

При измерении *горячего конденсата* с температурой выше 100° , при падении давления, его испаряется столько, сколько требуется для охлаждения остатка до 100° . Если пар конденсируется при 4 ат избыточных = 5 ат абсолютных, то неохлажденный конденсат имеет температуру 151° и теплосодержание 153 ккал/кг . При падении давления до 1 ат он должен перейти к 99° и к теплосодержанию 99 ккал/кг и остающиеся $153 - 99 = 54 \text{ ккал/кг}$ должны пойти на испарение. Из одного кг конденсата должно образоваться $x \text{ кг}$ пара при 1 ат давления и 639 ккал/кг теплосодержания, отсюда получаем $153 = 639 \cdot x + 99 (1 - x)$, или $x = 0,10$. Следовательно, должно испариться 10% конденсата.

Можно предотвратить испарение, если охладить конденсат перед выпуском, лучше до понижения давления, выпуская его через холодильник. Если конденсат должен быть опять использован в горячем состоянии, то его приходится измерять по объему, пока он находится под давлением. Для этого необходим измерительный сосуд, подводная и отводящая трубка которого могут закрываться вентилями, и снабженный водомерным стеклом, разделенным ² на литры. Если речь идет об измерении малых количеств, то горячий конденсат можно выпускать в резервуар, стоящий на весах и наполненный холодной водой, причем подводная трубка должна быть погружена в воду. Увеличение веса определяет количество сконденсировавшегося пара (Л.).

Если же температура конденсата ниже 100° , потому ли что он конденсировался в вакууме или потому, что он успел охладиться по пути к выходу, то тогда вскипание не происходит. Бывает только спокойное испарение, которое легко устранить или ограничить, прикрывая измерительный сосуд свободно приходящейся крышкой. Испарение тогда прекращается, так как воздух над водой насыщен парами, в то же время невозможен подъем давления, чтобы выгнать пар наружу. Приходится только ограничить конвекцию на поверхности воды. Уже свободно брошенная на измерительный сосуд тряпка настолько ослабляет обмен воздуха между отверстием сосуда и водной поверхностью, что уже не получается сколько-нибудь значительных ошибок.

При измерении количеств пара в виде конденсата, механически увлеченная паром вода точно также будет взвешена как пар; таким образом всегда опреде-

¹ Таким образом обыкновенно и определяется расход кислорода из стальных баллонов (Прим. перев.).

² Т. е. деления на водомерном стекле нанесены так, что указывают прямо объем измерительного сосуда в метрах.

ляется вес влажного пара. Поэтому получаются расхождения по сравнению с методами, основанными на определении объемов пара (индикаторные диаграммы — § 68; паромеры — § 91) и потому не учитывающими воду, вследствие ее практически исчезающего объема. Для сравнения этих результатов нужно дополнительно определить влажность пара (§ 136). Практически почти всегда имеет значение количество собственно пара (сухого), которое является масштабом подведенного количества тепла. Однако, вследствие трудностей, связанных с измерениями влажности пара, обыкновенно для паропроизводительности парового котла, так же как и для расхода пара машиною, дают общий вес пара с заключающейся в нем влагой.

§ 68. Определение количеств по индикаторным диаграммам. На индикаторной диаграмме компрессора (рис. 157) атмосферная линия ab представляет давление, от которого начинается всасывание.

Отрезок ab представляет общий объем, описываемый поршнем компрессора, равный $0,01473 \text{ м}^3$, как и в § 66. От a до c не происходит никакого всасывания и только после падения давления ниже давления в пространстве всасывания открывается всасывающий клапан, и cb будет полезный ход всасывания. Отношение $cb : ab$ называется *объемным коэффициентом полезного действия компрессора*,

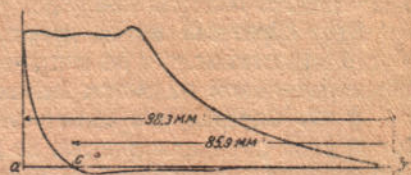


Рис. 157. Индикаторная диаграмма компрессора, $\frac{1}{2}$ натур. величины.

который по диаграмме определяется в $\frac{85,9}{98,3} = 0,874$; тогда $0,874 \cdot 0,01473 = 0,01287 \text{ м}^3$ будет объемом засосанного за один ход воздуха с одной стороны цилиндра.

Определенный таким образом объемный коэффициент, который не следует смешивать с коэффициентом подачи, выведенным в § 66, является величиной, необходимой для суждения о качестве машины. Во всяком случае следует иметь в виду, что отрезок ac может уменьшаться также и от неплотности нагнетательного клапана, а следовательно не всегда является безусловным улучшением. Что касается измерения количества воздуха, то вышеприведенное определение, согласно которому было засосано $0,01287 \text{ м}^3$ под атмосферным давлением, здесь мало поможет, так как мы не знаем температуры, которую следует приписать этому объему; приходится ее устанавливать приблизительно. Большей частью цилиндр бывает настолько горяч, несмотря на энергичное водяное охлаждение, что воздух нагревается уже во время всасывания. Поэтому определение количества воздуха по индикаторной диаграмме компрессора следует

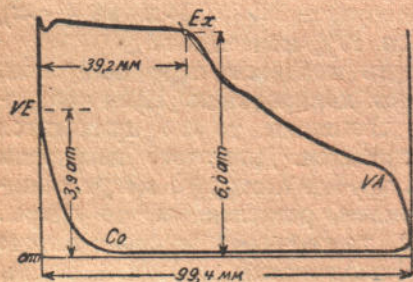


Рис. 158. Индикаторная диаграмма паровой машины.

рассматривать лишь как крайнее средство (Л).

Определение количеств по индикаторным диаграммам становится более надежным, когда дело касается насыщенного пара или жидкостей. При насыщенном паре имеется определенная зависимость между давлением и температурой, так что вышеупомянутая неопределенность температуры здесь отпадает. Рис. 158 представляет индикаторную диаграмму, снятую с паровой машины; по ней можно установить, что коэффициент наполнения $\varphi = \frac{39,2}{99,4} = 0,394 = 39,4\%$ хода поршня, и заканчивается при давлении $6,0 \text{ ат}$ избыточных. Конечно давление сжатия составляет $3,9 \text{ ат}$. Описываемый поршнем машины объем берем по рабочим чертежам, равным $16,1 \text{ л}$; вредное пространство, которое поршень в своем мертвом положении оставляет свободным, оценивается в 7% последнего или определяется, посредством заполнения его маслом, в $1,13 \text{ л}$. Тогда одна часть пара идет на то, чтобы поднять во вредном пространстве давление с $4,9 \text{ ат}$ абсолютных до давления выпуска, другая часть пара служит для наполнения, при постоянном

или слегка падающем давлении пространства, освобождаемого поршнем при его ходе вперед. Безразлично, что произведено этими частями в отдельности, в общем можно сказать: в момент впуска пространство в 1,13 л было заполнено паром 4,9 ат абсолютных соответственно $\gamma = 2,57 \text{ кг/м}^3$ (по таблицам), следовательно сначала было $0,00113 \cdot 2,57 = 0,00290 \text{ кг}$ пара (точка VE диаграммы). К моменту отсечки пространство в $0,394 \cdot 16,1 + 1,13 = 7,47 \text{ л}$ было наполнено паром давления 7,0 ат абсолютных и соответственно $\gamma = 3,59 \text{ кг/м}^3$, т. е. уже было $0,00747 \cdot 3,59 = 0,0263 \text{ кг}$ пара (точка Ex диаграммы). Разница $0,0268 - 0,00290 = 0,0239 \text{ кг}$ была впущена в течение хода. Другая сторона цилиндра, при несколько отличающейся диаграмме, дала при соответственном вычислении 0,0255 кг; количество пара, впущенное за один оборот, будет, таким образом, 0,0494 кг, что при числе оборотов 70 об/мин дает расход пара $0,0494 \cdot 70 \cdot 60 = 208 \text{ кг/час}$.

Относительно этого расчета, для которого в «Иссл. Маш.» § 78 будет дан точно проверенный пример, следует заметить, что он измеряет только тот пар, который к концу периода наполнения остается в цилиндре в виде пара; влага при ее ничтожном объеме ускользает от измерения. Поэтому результат не будет совпадать с результатами взвешивания конденсата. Так как во время периода наполнения вода конденсируется на стенках цилиндра, то будет учтен также не весь пар, поступающий в цилиндр в форме пара. При перегретом паре, вследствие незнания температур, возникают такие же неопределенности, как и в случае компрессора.

Где имеются другие методы для измерения количеств — газовые часы, метод наполнения, замер конденсата — их следует предпочесть. Однако, например, при больших компрессорах применение всех прочих методов вызывает затруднения.

§ 69. Определение количеств по средним скоростям. При очень больших сечениях каналов и протоков измерение протекающих количеств можно свести к измерению скоростей протекания через соответствующее сечение. При посредстве описанных в § 44—46 методов определяют в нескольких точках скорости v_1, v_2, v_3 , каждая из которых относится к определенному частичному сечению $f_1, f_2, f_3 \dots$, и получают

$$V = f_1 v_1 + f_2 v_2 + f_3 v_3 \dots \sum f \cdot v. \quad (5)$$

Если исчисление производится по средней скорости v_m , которая, будучи умножена на величину F полного сечения, даст секундный расход $V = F v_m$, то величина v_m должна подсчитываться, как это показано на рис. 165 для трубы круглого сечения. В этом случае, как вспомогательную работу, производят обмер профиля в исследуемом месте.

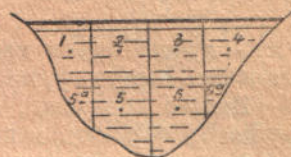


Рис. 159. Деление профиля потока.

Вопрос о таком способе измерения возникает при определении расхода воды в течениях рек или в каналах турбинных установок: профиль устанавливается промерами лотом, скорость — большей частью посредством вольтамантской вертушки (§ 44).

Поперечный профиль разделяется на ряд прямоугольников и в центре каждого из них производится измерение вертушкой. Остающиеся по краям клинья присоединяются к соседнему прямоугольнику. Имеющие прямоугольную форму желоба также разделяются по плану; согласно швейцарским нормам для гидрометрических измерений при исследовании гидравлических двигателей, установленных «Союзом швейцарских инженеров и архитекторов» в 1924 г., ширина жолоба и глубина воды в нем должны быть разделены на 24 части и скорости замерены в точках 1, 4, 9, 15, 20 и 23, в общем в 36 точках. По краям деления расположены гуще, так как здесь имеют место большие разницы скоростей; по направлению к стенкам и ко дну скорость стремится к нулю.

При гидрометрических измерениях больших потоков необходима возможно большая быстрота работы, так как условия быстро меняются. Поперек реки передвигается паром, а с него вертикально опускается гидрометрическая вертушка. Таким образом, можно достигнуть любой точки поперечного сечения,

одновременно определяя и ее положение. Время, положение и путь, пройденный водой, отмечаются на бумажной ленте хронографа (рис. 104). Промер профиля такой реки, как например, Днепр, во всяком случае занимает от 1 до 2 дней, в течение которых уровень воды может заметно измениться, особенно если речь идет об измерениях расхода воды и половодье. Обработка данных измерений требует много времени и не может быть здесь изложена.

При производстве подобных измерений правильнее устанавливать прибор принципиально таким образом, чтобы ось вольтмановской вертушки была перпендикулярна к проведенной поперек потока плоскости профиля, чем посредством направляющего крыла (вроде флюгера) установить вертушку по направлению течения в данном месте. Для исчисления расходов воды имеет значение только *слагающая* потока, перпендикулярная к плоскости профиля. Необходи-

мо только, чтобы при *отклонении* оси вертушки *от* направления потока *слагающая* скорости указывалась соответственно углу α отклонения (§ 44).

Точно также необходимо *быстро* производить измерения и в *турбинных жеслобах*, так как поддерживать нагрузку турбины на одной определенной величине можно только кратковременно; кроме того, такие испытания сопряжены с расходами. При больших установках предусматриваются специальные конструктивные устройства, позволяющие производить одновременные замеры многочисленными вертушками, помещаемыми или на вертикальной штанге, передвигаемой горизонтально (рис. 158) или, наоборот, на горизонтальной, передвигаемой вертикально; результаты опять отмечаются посредством многократного хронографа (Л.).

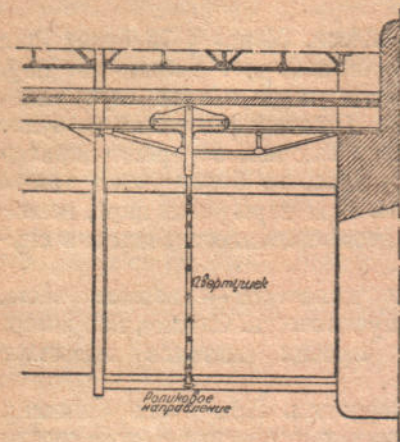


Рис. 160. Устройство для определения расхода воды турбиной, гидрометрическими вертушками.

В насосных и турбинных проводках скорость лучше всего измерять по 2 или 3 диаметрам. Для того, чтобы вводить и извлекать вертушку, предусматриваются специальные задвижки по рис. 161.

Вместо вертушки, скорость можно измерять также посредством напорной трубки (§ 46), как, например, на рис. 162. Преимуществом здесь является то, что скорость получают, не измеряя время. Тем не менее измерение вертушкой с электрической записью на ленте (рис. 105) несравненно удобнее при замерах, длительный же расчет компенсируется быстротой проведения испытаний. Быстрота очень важна, ввиду расходов, связанных с длительными испытаниями при больших турбинах, в реках же ввиду непостоянства условий. Напорная трубка мало подходит для регистрации, указывающие же приборы с достаточной перестанавливающей силой, как, например, кольцевые весы или (для воздуха) приборы колокольного типа (рис. 85) поглощают большие объемы и при изменении положения устанавливаются медленно. Поэтому напорная трубка хороша для единичных измерений, но не для массовых.

Для введения напорной трубки в наполненный водой трубопровод служит не слишком короткая направляющая бухса, которая ввинчивается в стенку трубы. При большой ширине трубы и больших скоростях воды напорную трубку необходимо снабжать наставкой, которая выходила бы через такой же сальник, расположенный диаметрально противоположно вводу, или входила бы в соответствующую трубку. Применение фасонных трубок ланцетообразного сечения (в продаже бывают медные и железные) уменьшает напряжения в трубках от изгиба быстротекущей водой. Чашечка над выходным отверстием наполнена салом, если труба находится под вакуумом. В этом случае необходим также и аспиратор, чтобы засосать воду в манометр, пока не будет достигнута разность высот h ; отводная трубка аспиратора должна иметь длину, соответствующую глубине вакуума. Устранение всех воздушных пузырьков в проводке к манометру весьма существенно, но трудно достижимо. Наоборот, в проводках под

давлением необходимо иметь возможность нагнетать воздух в манометр. Для этого при больших давлениях можно пользоваться, например, велосипедным воздушным насосом. При круглых проводках измеряемый объем будет $V = Fv_m$ отсюда

$$v_m = \frac{1}{F} \int v dF = \frac{1}{R^2} \cdot \int v \cdot d(r^2) = \frac{1}{2} \int (vr) dr.$$

Таким образом, чтобы найти среднюю скорость, откладывают значение $v = f(r^2)$ и определяют планиметрированием среднюю высоту, которая непосредственно

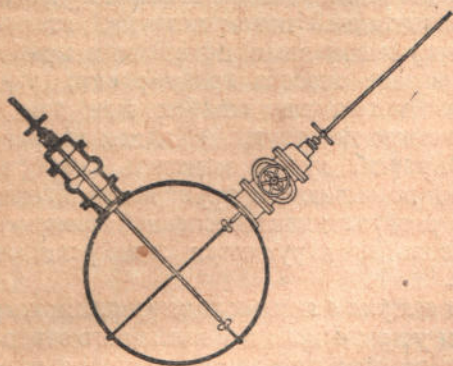


Рис. 161. Устройство для измерения вертикальных скоростей в подводящей трубе турбины.

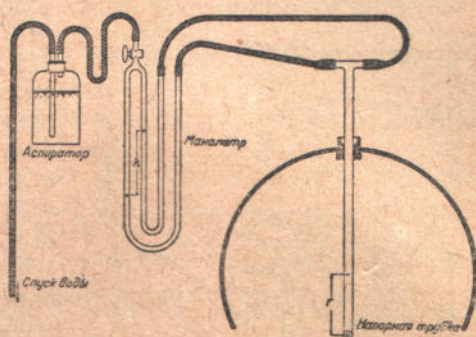


Рис. 162. Ввод напорной трубки в наполненную водой трубу с отрицательным давлением.

дает среднюю скорость по площади сечения, или наносят значения $vr = f(r)$; средняя высота диаграммы дает значение $\frac{1}{R} \int (vr) dr$, которое необходимо разделить на $\frac{R}{2}$ чтобы получить среднюю скорость. Таким образом, в трубе диаметром $2R = 1$ м были произведены следующие замеры: в показаниях по произвольно нанесенной шкале:

Соответственно было измерено отсюда	S (м)	=	0	0,05	0,19	0,42	0,63	0,77	0,91
	r (м)	=	0,47	0,42	0,28	0,05	-0,16	-0,30	-0,44
	v (м/сек)	=	2,6	2,9	3,2	3,5	3,4	3,3	3,0
	vr (м ² /сек)	=	1,22	1,22	0,895	0,175	0,54	0,99	1,32
	r^2 (м ²)	=	0,221	0,176	0,0784	0,0026	4,0256	0,0900	0,1936

Отсюда получаются три диаграммы (рис. 163—165). Из рис. 165 непосредственно получается планиметрированием $v_m = 3,08$ м/сек. По диаграмме же рис. 164 получается планиметрированием $vr_m = 0,777$, откуда при $\frac{R}{2} = 0,25$ м следует $v_m = \frac{0,777}{0,25} = 3,11$ м/сек. Отклонение объясняется неопределенностью, получающейся, когда кривая подходит к краю. Такие неточности в действительности бывают больше, чем это кажется по рис. 163.

Подобный же метод применим при измерении количества воздуха как в круглых, так и в прямоугольных каналах. Для измерения больших количеств воздуха в каналах вентиляционных или холодильных установок все сечение разбивается планомерно на участки и для каждого участка определяется скорость воздуха посредством анемометра или напорной трубки (§ 45 и 46). Необходимо возможно меньше нарушать движение воздуха своим телом и измерительными устройствами. Среднюю скорость можно также определить, помещая анемометр во время его работы в различные точки по всему сечению так, чтобы различные части сечения влияли равномерно на общий результат; однако, большей частью, действие крайних зон сказывается слабо (Л.).

Когда такие измерения проводятся в подводящей или исходящей трубе вентилятора или вообще в воздушных путях, размеры которых не очень велики в срав-

нении с размерами употребляемого анемометра, необходимо обращать внимание на два возможных источника ошибок. Во-первых, воздушный поток после введения прибора не остается тем же самым, каким он был до этого, так как сам прибор вызывает сопротивление. Следствием этого является то, что установка исследуется не в условиях практической эксплуатации, а при измененных. Является ли такое изменение существенным, должно быть взвешено в каждом отдельном случае. Во-вторых, измерение действительно протекающих количеств воздуха становится после введения прибора несколько неопределенным, причем скорость воздуха внутри оправы прибора оказывается меньше, чем в остальном сечении трубопровода. Первый источник ошибок вызывает уменьшенный по сравнению с практической эксплуатацией поток воздуха, второй ведет к преуменьшенным показаниям прибора (см. влияние способа градуировки, стр. 115). Оба источника ошибок при таких обстоятельствах действуют в одном направлении. Впрочем, лучше измерять скорость воздуха по всасывающей трубе вентилятора, чем в напорной, так как в последней движение воздуха сильнее нарушается завихрениями (§ 46; Л.).

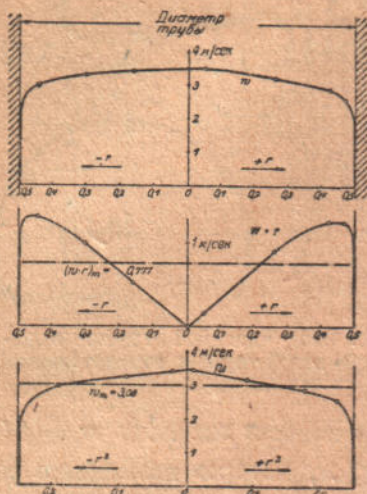


Рис. 163, 164, 165. Определение средней скорости по диаграммам распределения скоростей в круглой трубе.

Обмен воздуха в жилых помещениях можно измерять и у приточного и у выходного отверстия, если внутри помещения давление равно давлению окружающего пространства, т. е. если нейтральная зона приходится в помещении и внутренняя температура почти одинакова с внешней. В помещениях с приточной вентиляцией необходимо измерять у приточного отверстия, потому что часть воздуха выходит из помещения не через отводный канал, а через неплотности, и в отводном канале эта часть останется неизмеренной; наоборот, в помещениях с вытяжной вентиляцией обмен воздуха нужно измерять только в вытяжном отверстии.

Отверстия большей частью закрываются решетками. Не следует удалять их во время испытания, так как при этом снимается значительная часть сопротивлений и эксплуатационный расход заметно меняется. Можно применять анемометр с крыльчатым колесом, имеющим не слишком малый диаметр кольца, перед решеткой выбрасывающего отверстия. Измеренную скорость воздуха следует умножить на полное сечение решетки, а не на ее живое сечение, так как даже на коротком расстоянии перед решеткой воздушный поток еще не разделен. Нужно мерить близко к выбрасывающему отверстию, так как всасывающее действие отверстия очень быстро перед ним падает. В приточном отверстии отношения складываются совсем иначе. Воздушный поток, пройдя решетку, оказывается разделенным, и отдельные потоки имеют скорость соответственно живому сечению решетки и даже еще повышенную, в зависимости от сжатия струи. Анемометр же, если его держать вплотную к решетке, показывает неполную скорость частичных потоков, так как они затрагивают только части колеса, тогда как части, попадающие в зону затишья за прутьями решетки, действуют тормозяще. Поэтому анемометр опять показывает некоторую среднюю скорость. Остается неопределенным, показывает ли прибор среднюю скорость по отношению к живому или к полному сечению решетки. Воздушный поток из приточного канала далеко проникает в помещение (в противоположность распределению линий потока перед отводным каналом). Поэтому рекомендуется производить измерение скорости на некотором умеренном расстоянии от устья канала, где отдельные потоки за зонами затишья уже выравнялись, тогда как общий поток еще не рассеялся вследствие трения о воздух помещения. Анемометры

с чашечным крестом и напорные приборы мало подходят для измерений перед решетками (Л.).

Скорость в середине трубы или канала значительно больше средней скорости. Трение о стенки канала действует так, что около стенок происходят меньшие скорости, чем в середине канала. При переменной шероховатости стенок, при изменении размеров канала, а также при искривлениях в ходе канала, также изменяется отношение средней скорости к скорости в середине канала. Поэтому и невозможно определить протекающее количество при измерении только в середине канала. Однако, можно эмпирически отградуировать раз навсегда установленный в канале измеритель скорости, лучше всего статический, так, чтобы по нему можно было непосредственно достаточно точно определить секундные количества протекающего воздуха.

§ 70. Измерение воды помощью щита. Измерение количества воды помощью щита применяется обычно в гладких каналах. В последних вместе с протекающей водой может передвигаться с небольшой игрой щит. Последний приобретает

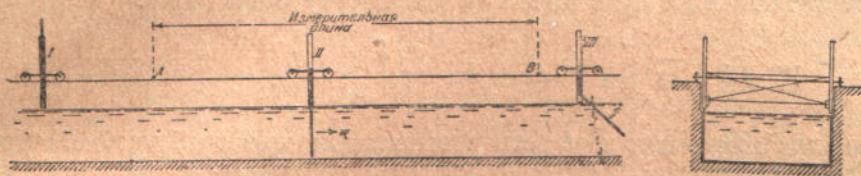


Рис. 166. Измерение воды помощью щита.

скорость воды, что дает возможность измерить ее посредством измерения скорости несущей щит тележки. Это устройство указано на рис. 166. В точке I тележка находится в состоянии покоя и щит поднят вверх. Щит, после освобождения его запора, падает в своих направляющих из U-образного железа и тележка приходит в движение. В точке II тележка находится в движении и проходит измеряемый участок, определяемый тем, что в точках A и B тележкой замыкаются электрические контакты. Тележка, пройдя этот участок, упирается в упор, который ее удерживает и одновременно размыкает соединение между нижней погруженной и верхней направляемой частью щита, после чего нижняя часть, поворачиваясь, выходит из воды (Л.). Щит и тележка, изготовленные из алюминия и бесшовных стальных труб, настолько легки, что их масса, примерно в 40 кг, по сравнению с массой воды не имеет никакого значения. Поэтому их погружение не имеет никакого влияния на движение воды. Вместе с тем сопротивление катящейся тележки, при тщательной ее установке, настолько незначительно, что перед щитом образуется напор только в 1—2 мм, который, по сравнению с глубиной воды, не играет никакой роли. Проходящее через щель количество воды может быть кроме того учтено. С другой стороны, отпадает источник ошибок, который при других методах измерения возникает от уменьшения скорости по краям, так как щит обеспечивает одинаковую скорость во всем поперечном сечении. Движение тележки определяется помощью замыкания контактов A и B или еще лучше нескольких промежуточных контактов, отмечающих черточки на диаграммной бумажной ленте. Об этом способе измерения скорости было уже сказано в § 36 и упомянуто, что целесообразно наносить наряду с отметками пути также и отметки времени, вместо того, чтобы целиком полагаться на равномерное перемещение бумажной ленты. Если кроме регистрации пути щита и времени еще регистрировать число оборотов турбины, а также уровень воды, то получается совокупность данных, необходимых для испытания турбины. Совершенно очевидно, что такое исчерпывающее оборудование может быть установлено лишь на испытательных станциях поверочных учреждений для постоянной работы. Измерение при помощи щита применяется при расходах до 15 м³/сек. Щиты шириной в 6 м при глубине воды в 3,5 м тогда нельзя было бы поднимать при всяком испытании. В раме был устроен ряд заслонок, которые все одновременно закрывались и одновременно открывались. С другой стороны, при сравнении методов измерения помощью щита и измерением посредством

отверстия для истечения выявилось, что измерение щитом вполне надежно даже при скоростях воды от 3 до 5 м в секунду. Таким образом, область его измерения очень велика; кроме того, при пользовании щитом не требуется никаких поправочных коэффициентов или прочих вспомогательных средств. Измерение помощью щита при хороших вспомогательных средствах могло бы явиться лучшим способом измерения больших количеств воды.

§ 71. Измерение с запрудами. При протекании воды через запруду, как это видно на рис. 167, можно по аналогии, имеющей место при отверстиях, для истечения, судить по уровню h воды над гребнем запруды о количестве протекающей воды и измерять его, наблюдая за высотой h .

Частица воды, расположенная на глубине x от верхнего уровня воды, имеет теоретически скорость $v = \sqrt{2gx}$. С этой скоростью вода течет в узкой полоске высотой dx и длиной b , где b — ширина запруды, т. е. длина ее гребня. Площадь этой полоски $dF = b \cdot dx$ и проходящий через нее в каждую секунду объем воды равен $dV = b \cdot dx \cdot \sqrt{2gx}$. Интегрируя в пределах от $x=0$ до $x=h$, получаем теоретически проходящий через запруду объем воды:

$$V' = b \sqrt{2g} \int_0^h \sqrt{x} \cdot dx = b \sqrt{2g} \left[\frac{2}{3} x^{3/2} \right]_0^h = \frac{2}{3} b \sqrt{2gh^3}. \quad (1)$$

Если для измерения посредством выпускных отверстий удобно, что измеряемое количество воды зависит от квадрата наблюдаемой высоты ее уровня, то в данном случае это неудобно. Степень, в которой входит V , в данном случае даже ниже, чем степень h и, таким образом, отсчитываемые высоты напора при различных количествах воды мало разнятся друг от друга. Помимо того, при измерениях запрудами приходится иметь дело с небольшими высотами напора, а небольшие погрешности при отсчетах высоты напора оказывают большое влияние на конечный результат. Поэтому отсчеты высоты напора следует производить особенно точно.

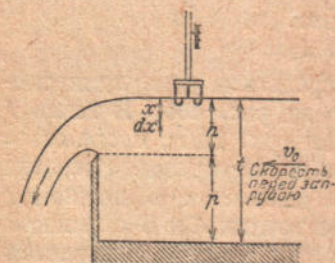


Рис. 167. Запруда с крючковым измерителем.

В действительности опытные определения количества воды, протекающих через запруду, дают значения по величине меньше теоретического. Вместо теоретического объема воды $V' = \frac{2}{3} b \sqrt{2gh^3}$, протекает лишь объем V ; отношение обеих величин $k = \frac{V}{V'}$ называется коэффициентом истечения (Теоретический вывод — Лаук, Л.). Тогда (Полени 1767)

$$V = \frac{2}{3} k \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot h^3} = 2,953 k \cdot b \cdot h^{3/2}. \quad (2)$$

То обстоятельство, что через запруду проходит меньше воды, объясняется, главным образом, явлениями сжатия. Как видно из рис. 168, уровень воды начнет снижаться на значительном расстоянии до запруды. Внизу струя также сжимается, если дать свободный доступ воздуху снизу. Такая постоянная вентиляция струи необходима для измерения, чтобы не допустить присасывания струи к запруде. Сжатие может быть также боковым, если ширина запруды меньше ширины подводящего канала (горизонтальная проекция рис. 168). Если запруда занимает всю ширину канала (горизонтальная проекция рис. 168), то бокового сжатия не бывает. Для регулирования течения применяют, в зависимости от потребности, запруды разнообразнейших типов с наклоном к направлению потока, без вентиляции, без острых ребер, с боковым сжатием. Для измерения рекомендуется применять запруды только самой простой формы и наиболее качественной, т. е. запруды с хорошей вентиляцией, установленные перпендикулярно к потоку, с острыми ребрами, с вертикальным откосом и без бокового сжатия (рис. 168).

Коэффициент истечения k такой измерительной запруды зависит от следующих условий: во-первых, имеет значение, где производится отсчет высоты h , непосредственно ли за запрудой у s , или же дальше, у s_1 (рис. 168). Если измерение производится у s , то, вследствие упомянутого понижения уровня воды, k оказывается больше. k зависит также от глубины t подводящего канала, точнее говоря от отношения $t : h$, так как в мелком (плоском) подводящем канале течение воды быстрее еще до достижения ее запруды, поэтому у запруды вода приобретает большую конечную скорость, чем если бы она протекала в глубоком канале. При узкой запруде и узком проточном канале трение имеет заметное влияние, так как оно тормозит движение воды у боковых стенок. Многочисленные исследователи определяли количество воды, протекающей через обыкновенную запруду, а также вычислили коэффициент истечения (Л.). При этом выяснилось, что трудности сопряжены не с измерением b , t и даже не с определением h (а эту величину следует определять только в соответствующем удалении от запруды); тогда h можно определить в зависимости от условий с точностью до 0,1 мм. Вопрос заключается лишь в том, каким методом следует определить действительное протекающее количество. Запруды служат для измерения более мощных водных потоков, когда взвешивание как метод измерения применимо весьма редко. Большие бетонные измерительные резервуары должны быть достаточно плотными. Точное разграничение начала и конца установленного потока довольно затруднительно и это, а также ненадежность в отметке времени, вынуждает удлинять, по возможности, время испытания. Эти трудности, аналогичные с встречающимися при определении больших количеств газа (§ 55), показывают, что запруды нельзя проверять самостоятельно, так как получаются совершенно случайные результаты в сравнении с нижеприводимыми данными, которые в большинстве случаев основаны на проведенных частью с большими затратами измерениях в различных лабораториях. Результаты испытаний многочисленных исследователей критически проработаны Фрезе одновременно с результатами собственных испытаний (Л.).

Фрезе дает величину:

$$k = \left(0,615 + \frac{0,0021}{h} \right) \cdot \left(1 + 0,55 \frac{h^2}{t^2} \right), \quad (3)$$

где величина, заключенная в первых скобках, действительна для истечения из очень глубокого канала, величина во вторых скобках характеризует влияние скорости до запруды в каналах умеренной глубины. Подобным же образом Ребок критически проработал результаты новейших исследований в виде короткой формулы:

$$V = 2,953 \cdot \left(0,6035 + 0,0813 \frac{h_e}{p} \right) \cdot b \cdot h_e^{2/3}, \quad (4)$$

где $2,953 = \frac{2}{3} \sqrt{2g}$; $h_e = h + 0,0011$ м обозначает приведенную высоту, которая измеряется непосредственно, если поместить начало масштаба высоты подпора на 1,1 мм ниже ребра запруды; $p = (t - h)$ м — высота ребра запруды, считая от дна подводящего канала. Выражение в скобках соответствует, следовательно, коэффициенту истечения k формулы (2), но только относится к h_e , а не к h в степени $\frac{2}{3}$, т. е. заметная лишь при незначительных высотах часть коэффициента истечения включена в эту разность.

Формула Ребока базируется на ряде более многочисленных испытаний и преимущественно значительно больших водных потоков, чем испытания Фрезе. Этой формулой пользоваться проще и, по мнению Ребока, она дает повторные опытные значения, отличающиеся друг от друга всего на 1%. Погрешность самой формулы следовательно еще меньше. В таблице 6 дано сопоставление обеих формул Фрезе и Ребока; у Фрезе k на 2% больше, чем у Ребока.

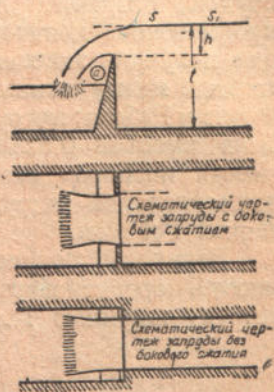


Рис. 168. Сжатие струи на запруде.

Сопоставление количеств, протекающих через измерительную запруду, шириною в 1 м без бокового сжатия по Фрезе и Ребоку

Высота подпора . . . h (м)	0,2	0,2	0,5	0,8	
Высота ребра запруды p (м)	0,5	1,0	1,0	1,0	
Глубина воды t (м)	0,7	1,2	1,5	1,8	
<hr/>					
По Фрезе:	k	0,654	0,635	0,657	0,6845
	$h^{1/2}$	0,0894	0,0894	0,3535	0,7155
$V=2,953 \cdot k \cdot h^{1/2}$ (м ³ /сек)		0,1727	0,1677	0,685	1,446
<hr/>					
По Ребоку	k	0,638	0,620	0,644	0,6685
	$h_e^{1/2}$	0,0901	0,0901	0,3545	0,717
$V=2,953 \cdot k \cdot h_e^{1/2}$ (м ³ /сек)		0,1697	0,1650	0,6735	0,415
<hr/>					
Разность (м ³ /сек) . .		-0,0030	-0,0027	-0,0115	-0,031
Разность (в проц. к ном. значению)		-1,75	-1,6	-1,7	-2,2

Как видно из приведенных результатов, при использовании формулы Ребока вместо применяющейся до сего времени формулы Фрезе, коэффициент полезного действия турбины несколько повышается, коэффициент полезного действия насоса ухудшается.

Как было упомянуто в § 64, Кишнер и Эстерер исследовали точность измерения с запрудой, причем для протекающих количеств они получили значения, средние между данными Фрезе и Ребока; запруда была высотой 0,523 м, высота подпоров равнялась от 0,1 до 0,4 м. Испытание модели с помощью прямоугольной запруды в масштабе 1:7 давало в точности величины, полученные Ребоком.

Величины, полученные Ребоком, могут быть использованы для таблицы 7, дающей ориентировочно величины некоторых протекающих количеств через запруду шириною 1 м. Однако, ненадежность метода измерения запрудой все

Таблица 7

Протекающие количества (в м³/сек) для запруды шириной 1 м по Ребоку (равенство 4)

Высота подпора h (м)	0,2	0,3	0,5	0,75	1,00	
Высота запруды p (м)						
0,3	0,1752	—	—	—	—	
0,5	0,1694	0,3181	—	—	—	
0,75	0,1664	0,3101	0,689	—	—	
1,00	0,1650	0,3061	0,6745	1,276	—	
	1,25	0,1641	0,3038	0,666	1,253	1,976

же должна расцениваться в пределах $\pm 1\%$. Влияние температуры воды на запруду остается, впрочем, невыясненным.

О конструкции запруды необходимо сказать нижеследующее: высота подпора воды должна быть не ниже 0,1 м, лучше не ниже 0,2 м, высота ребра плотины p должна по меньшей мере равняться 0,3 м, иначе применяемые формулы лишь плохо определяют величину k . Высота подпора должна быть, по возможности, большей, чтобы погрешность при измерении была относительно мала. Поэтому ширину запруды b выбирают возможно малой, однако так, чтобы при отсутствии бокового сжатия она была не меньше, чем h , иначе трение о боковые стенки канала становится помехой. Испытания производятся при высоте подпора h до 0,8 м, высоте ребра плотины p до 1,2 м, эти величины достаточны также и для больших соотношений. Высота подпора h не должна превышать 0,6 p , чтобы распределение скоростей в подводящем канале не было слишком неравномерным. Принимая это во внимание, получаем что наименьшее измеримое с помощью запруды количество воды при $h=0,2$; $b=0,2$ м равняется: $0,2 \times 0,1696 = 0,034$ м³/сек. Запруда (рис. 168) со стороны подъема воды должна представлять собою вертикальную стенку, другая сторона ее должна иметь крутой наклон, чтобы обеспечить возможную через отверстия a вентиляцию струи. Будет ли струя по выходе из запруды без бокового сжатия снова сужена боковыми стенками или же может свободно расширяться — это имеет, кажется, малое значение. Вода должна спадать лишь за гребнем запруды настолько

глубоко, чтобы была обеспечена ее вентиляция. При широких запрудах это падение должно быть возможно глубже или необходимо устройство искусственной вентиляции струи воды с помощью трубопровода. Во всяком случае, за гребнем запруды струя должна быть совершенно свободной. Следует периодически очищать гребень запруды от грязи, проводя вдоль его палкой. Гребень запруды обычно изготавливается из строганого железа, но можно ограничиться также применением гладко обструганной доски, которую, конечно, следует установить точно горизонтальной. Некоторые данные о влиянии различной ширины ребра и шероховатости запруды будут приведены ниже для V-образной запруды. Измерение высоты напора h должно производиться настолько далеко вверх по течению от запруды, чтобы не было заметно никакого понижения уровня. По Ребоку рекомендуется производить измерение на расстоянии $4h$ или $2t$ за запрудой, причем для h и t следует брать, понятно, максимальные существующие значения. По Френсису (Л.) можно поставить на дно канала доску B с отверстием, параллельным направлению потока. Из отверстия проводят какую-нибудь свинцовую трубку a (рис. 169), доводя ее до измерительного колодца M , достаточной ширины, чтобы избежать ошибок вследствие капиллярности. Если свинцовый трубопровод непроницаем, то получают правильные показания даже и в том случае, если трубопровод выведен непосредственно за запрудой. Следовательно, понижение уровня не оказывает влияния на давление воды на дне канала. Если измерению мешает движение волны на поверхности воды, то наблюдение производят в измерительном деревянном колодце, в который вода поступает только снизу через отверстие. Для измерения может служить крючковый измеритель Френсиса (рис. 167), лучше всего с острием из слоновой кости; острие должно выходить на поверхность воды. Фрезу вместо одного применяет три острия, лежащие в одной горизонтальной плоскости, причем два нижних должны касаться поверхности воды снизу, верхнее острие — сверху.

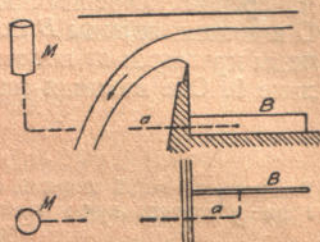


Рис. 169. Измерение высоты напора по Френсису.

Всякую запруду можно превратить в таковую без бокового сжатия, если сузить водный поток по течению выше запруды посредством ограждения из досок до ширины запруды; такое устройство показано штриховым пунктиром на рис. 168.

Как выше было указано, следует избегать всех сложных устройств водосливов для измерения. Кроме простой запруды без бокового сжатия целесообразно применение только еще V-образной запруды.

При этой запруде вода спадает через клинообразную выемку в подпорной стене. Выемка имеет форму угла, вершина которого обращена вниз. Угол этот обычно равен 90° , так что стороны его идут кверху под углом 45° . Ребра водослива, как и в простой запруде, должны быть заострены, струя, что легко достижимо, должна снизу полностью омываться воздухом, скорость притекающей воды должна быть незначительной, и вся высота струи должна быть охвачена выемкой. Для такой запруды согласно ранее принятого обозначения (Л.), действительно протекающий объем равен

$$V = \frac{8}{15} k \sqrt{2gh^5} = 2,36 \cdot kh^2 \sqrt{h}. \quad (5)$$

Барр произвел обстоятельные исследования коэффициента истечения k , результаты которых в единицах метрической системы даны в таблице 8 (Л.). Для измерения незначительных количеств V-образная запруда более употребительна, чем простая, так как ее можно использовать при напорах даже в 50 мм.

Отпадает предположение, что этой запруде надо отдать предпочтение, потому что при ней ширина запруды не избирается произвольно, как это бывает в простой запруде, ибо показания V-образной запруды правильны только для бесконечно большого подводящего канала, т. е. при малой скорости проходящей воды. На практике у V-образной запруды берут произвольно ширину и глубину

Коэффициенты истечения k и сливающиеся количества V м³/сек для V-образных измерительных запруд. Начальная скорость притекания равна нулю

Высота напора h (м)	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,25
Коэффициент истечения k	0,597	0,594	0,590	0,586	0,584	0,582
Сливающиеся количества V м ³ /сек	0,000786	0,00216	0,00440	0,01206	0,0247	0,0430

канала, у простой же запруды без бокового сжатия — ширину запруды и глубину канала. Кроме того, в V-образной запруде вследствие изменения ширины струи с высотой напора, отношение ширины подводящего канала к ширине струи трудно определить. Поэтому V-образная запруда рекомендуется для измерения умеренных количеств воды при истечении из большого бассейна. О влиянии ширины B подводящего канала и его глубины t (давая обе эти величины кратными от высоты напора h) Барр приводит следующие данные в таблице 9. Оба влияния (ширины и глубины канала) противоположны друг другу.

Таблица 9

Влияние конечной ширины канала B и глубины канала t на истечение воды через V-образную запруды по Барру

	Отношение $B : h$					Отношение $t : h$			
	∞	8	6	4	3	∞	4	3	2
$h=0,075$ м	1	1,000	1,002	1,007	1,013	1	—	1,000	0,996
$h=0,1$ м	1	1,000	1,001	1,003	1,007	1	1,000	0,997	0,992

их равнялась 1,6 и 2,1 мм. Недостаточное заострение имеет заметное влияние только при малых напорах. Любопытно, что Барр приводит размер ребер шириною в $\frac{1}{16}'' = 1,6$ мм, обычно применяемый в Англии, тогда как в Германии, как известно, ребра изготавливаются довольно острыми, максимальной ширины

Таблица 9а

Влияние формы запруды на сток воды через V-образную запруды по Барру

	$h=0,075$ м	$h=0,1$ м	$h=0,125$ м
Чисто заостренные ребра запруды	1	1	1
Ребра запруды в $\frac{1}{16}'' = 1,6$ мм ширины (обычные)	1,006	1,003	1,001
Ребра запруды в $\frac{1}{12}'' = 2,1$ мм ширины	1,013	1,007	1,004
Поверхность стены запруды со стороны верхней воды			
Гладкая бронза	1	1	—
Окраска шеллачным лаком	1,004	1,003	—
Покрытая наждаком средней величины	1,018	1,012	—
Покрытая крупным наждаком	1,024	1,017	—

в 0,5 мм. Шероховатость стороны запруды, обращенной к верхней воде, значительно увеличивает количество сливающейся воды, что вносит в измерение элемент ненадежности. V-образный вырез в V-образной запруде внизу должен быть начисто заострен, не столько потому, что маленькое закругление сильно

влияет на количество воды, сколько потому, что оно влияет на определение нулевой точки высоты напора. Эту нулевую точку определяют, приостанавливая течение воды, давая последней возможность начисто сбегать через запруду. Закругление выреза запруды сильно влияет на это определение и последующее измерение нулевой точки напора. Впрочем, для определения нулевой точки необходимым условием является также очень хорошее уплотнение между верхней и нижней водой при монтаже запруды. При невозможности остановить приток воды, определение нулевой точки следует произвести иным путем.

§ 72. Теория измерения помощью истечения. Одним из самых удобных специфических технических методов измерения, пригодных как для незначительных, так и больших количеств газов и жидкостей, является применение круглых отверстий, через которые измеряемое количество жидкости вытекает в виде струи. Пусть (максимальная) скорость в (минимальном) сечении струи равна v м/сек. Этой скорости соответствует перепад давления, равный $p = \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \left(\frac{кг}{м^2} \right)$, который как действующее давление и является мерою количества протекающей жидкости. Таким образом, протекающее через отверстие диаметром d и сечением $f = \frac{1}{4} \pi d^2$, количество теоретически равно:

$$V = f \cdot \sqrt{2gp/\gamma} \text{ м}^3/\text{сек} \quad \text{или} \quad G = f \sqrt{2gp \cdot \gamma} \text{ кг/сек.} \quad (1)$$

Истечение может при этом совершаться через диафрагму или шайбу с острыми краями или через закругленное измерительное сопло. Диафрагма или шайба вызывают сжатие струи, сопло, при хорошем выполнении (стр. 176), не вызывает никакого сжатия. Оба эти типа приборов для истечения мы объединяем под наименованием «Дроссельные устройства».

В резервуаре можно устроить отверстие довольно значительных размеров таким образом, чтобы жидкость или газ вытекали из него; или его можно вставить в трубопровод, и тогда жидкость протекает через него. При постоянно протекающих жидкостях количество, протекающее в единицу времени, обозначается как поток (единица размерности: $\text{м}^3/\text{час}$ или $\text{кг}/\text{час}$, при паре большей частью $\text{т}/\text{час}$). Поэтому в обоих случаях речь идет об измерении истечения или измерении протока. В конечном счете речь идет не столько о том, течет ли жидкость из сосуда или по трубе, сколько о том, что при истечении она находится в покое, тогда как при протоке она имеет уже начальную скорость в зависимости от ширины трубы; истечение представляет предельный случай потока, у которого отверстие незначительно по сравнению с сечением подводимой жидкости. При круглых отверстиях диаметром d в круглых трубопроводах диаметром D отношение площадей отверстий $m = f/F = d^2/D^2$ или $\sqrt{m} = d/D$ является мерою начальной скорости.

Требуемая равенством (1) квадратичная зависимость между количеством и давлением совпадает с опытными данными измерения, если скорость имеет определенное, устанавливаемое числом Рейнольдса Re минимальное значение. Тогда следует подставить в широких пределах постоянное начальное число $\alpha = \varphi \cdot \mu$, зависящее от:

- коэффициента сжатия μ ,
- коэффициента скорости φ ,
- отношения площадей отверстий m

и кроме того, при скорости ниже некоторого наименьшего значения, также от истекающего количества или от числа Рейнольдса Re . Кроме того, у газов и пара существует еще зависимость от отношения расширений p_2/p_1 ; эту зависимость учитывает тогда второй коэффициент ε .

§ 73. Измерение жидкости истечением. Рис. 170 дает схематическое изображение явлений, происходящих при обыкновенном истечении жидкости из резервуара, и показывает, что струя, при истечении из диафрагмы с острыми краями, испытывает сжатие таким образом, что в поперечном сечении отверстия f (диаметром d) существует скорость $\mu \cdot v$ и лишь в поперечном сечении сжатия $\mu \cdot f$ существует скорость v ; для обоих сечений $V = \mu \cdot f \cdot v$. Перепад давления можно измерить как высоту столба истекающей жидкости в метрах. В этом

случае $v = \sqrt{2gh}$ м/сек есть теоретическая скорость истечения, поскольку начальная скорость истечения очень незначительна и трение невелико. Величина $h' = \frac{v^2}{2g}$ (м ст. ж.) обозначается как сопряженная с v высотная скорость; $g = 9,81$ м/сек² есть ускорение силы тяжести. Сжатие означает, что воды истекает меньше, чем истекло бы при $\mu = 1$, но это не означает никакой потери энергии, поскольку мы имеем в виду (идеальную) жидкость без внутреннего трения. Для истечения такой жидкости из насадок с острыми краями, гидродинамическая теория (Л.) дает величину коэффициента сжатия, равную $\mu = \frac{\pi}{\pi + 2} = 0,611$. Прежние опыты Вайсбаха установили истинное значение коэффициента сжатия в тонкой стенке $\mu = 0,615$. Лишь у (идеальной) жидкости скорость v в сжатом сечении имеет теоретическую величину $v = \sqrt{2gh}$. Для жидкости реальной в зависимости от ее вязкости действительная скорость меньше требуемой, так что $v = \varphi \cdot \sqrt{2gh}$, где $\varphi < 1$ — коэффициент скорости.

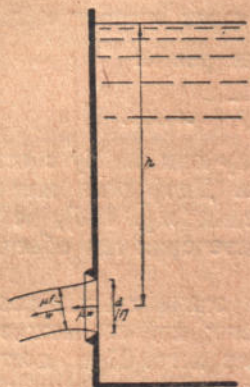


Рис. 170. Истечение из резервуара.

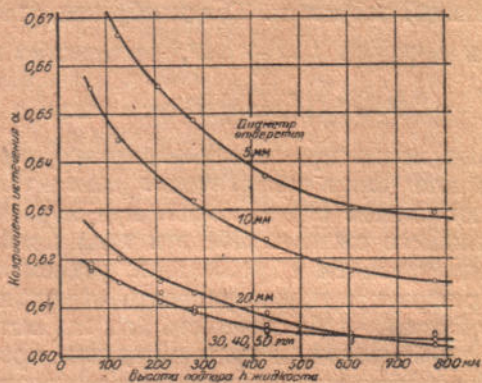


Рис. 171. Коэффициенты истечения α для воды, вытекающей через диафрагму, по Шнейдеру.

Вообще, истекающее количество будет меньше теоретического в отношении коэффициента истечения $\alpha = \varphi \cdot \mu$, где значения φ и μ в отдельности вряд ли имеют значение, к тому же они трудно определяемы.

Теперь можно получить основные равенства для истекающих количеств: истекающий объем.

$$V = \alpha \cdot f \cdot \sqrt{2gh} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (2)$$

откуда истекающий вес:

$$G = \alpha \cdot f \cdot \gamma \cdot \sqrt{2gh} \text{ кг}/\text{сек}, \quad (2a)$$

где γ кг/м³ — удельный вес жидкости.

Равенства (1) и (2) требуют квадратичной зависимости между V и h . Это означает, что коэффициент истечения α должен находиться в зависимости только от формы и устройства отверстия, но не от h . Что это так — установлено опытами, при которых для данного отверстия f относящиеся к h значения G и V определяли, и, используя в зависимости от обстоятельств, одно из вышеприведенных уравнений, например, уравнение 2, находили

$$\alpha = \frac{G}{f \cdot \gamma \sqrt{2gh}}. \quad (3)$$

Такие опыты показали, что в известных пределах α более или менее постоянно.

За последнее время были произведены испытания Шнейдера (Л.), результаты которых для воды изображены на рис. 171. Из них видно, что для диафрагм с минимальным диаметром в 20 мм и для высоты напора свыше 300 мм $\alpha = 0,605$ до 0,61 — есть обычная средняя величина. Опыты Шнейдера дают

основание считать, что, пользуясь диафрагмами, можно получать исключительно точные результаты, если позаботиться об устранении турбулентного движения воды и если острые ребра диафрагмы срезаны по Шнейдеру, а именно, чтобы цилиндрическая часть получилась следующей глубины:

диаметр насадки (мм)	50	40	30
толщина ребра (мм)	0,35	0,29	0,14

На основании опытов Барра с V-образной запрудой (стр. 162) можно вынести заключение, что не так важно точное соблюдение этих размеров, в то время, как во всяком случае, правила измерения протоков требуют, чтобы ребро запруды было острым как нож, и не давало никакого отражения.

Дальнейшие исследования Шнейдера касались преимущественно соляных растворов при исследованиях холодильных установок. Из таблицы 10 видно, что данные рис. 171 можно применять для различных целей, а также и для растворов. Для более точных измерений, в особенности при очень незначительных отверстиях и высотах напора, можно пользоваться одной из формул, приведенных в правилах по холодильным установкам (Л.). При довольно больших отверстиях и высотах напора можно, на основании данных таблицы 10, предположить возможность применения данных рис. 171 и для других не очень вязких жидкостей. Решке занимался исследованием растворов $MgCl_2$ (Л.).

Чтобы произвести измерение истечения воды, в резервуаре, подобном изображенному на рис. 172, делают отверстие соответствующей величины, иногда даже несколько отверстий разной величины, причем некоторые из них закрываются пробками так, чтобы остающиеся открытыми отверстия создавали удобную для измерения высоту напора. Вода подводится в *a*, ряд же перегородок, а также наличие в главной камере плавающей на воде деревянной доски служат для успокоения поверхности воды. Если имеется несколько отверстий, то они должны лежать на одинаковой высоте.

Вопрос о том, следует ли отдавать предпочтение диафрагме с острыми гранями или закругленному соплу, был решен в прежних изданиях настоящей книги в пользу сопла. Это мнение подтверждается также работами Шнейдера, доказавшими, что для рассола, а также для разных температур коэффициент истечения по существу тот же, что и для холодной воды, что, следовательно речь идет о стабильном соотношении. В дальнейшем исследования процесса истечения, произведенные I. G. Farbenindustrie показали, что коэффициент истечения, при пользовании диафрагмой, остается неизменным даже при незначительных скоростях.

Вместе с тем, установка диафрагмы значительно проще, если, согласно указаниям Шнейдера, ширину острой грани выбрать в пределах 0,14—0,35 мм,

Таблица 10

Сопоставление коэффициентов истечения из насадки (диафрагмы) с острыми краями для холодной воды с коэффициентами—для горячей воды и раствора поваренной соли по Шнейдеру

Высота давления (мм)	Наименование жидкости	Температура в градусах С	Удельный вес ($KГ/СМ^3$)	Вязкость град. Энглера	Диаметр отверстий		
					50 мм	20 мм	5 мм
779	Вода	+40	992	0,942	0,6051	0,6011	0,6240
		+15	999	1,022	0,6043	0,6019	0,6294
	Рассол	+15	1 070	1,032	—	0,6045	0,6329
		+15	1 140	1,061	—	0,6043	0,6344
		+15	1 190	1,36	0,6059	0,6054	0,6359
-14	1 198	1,36	0,6059	0,6095	0,6432		
279	Вода	+40	992	0,942	0,6095	0,6091	0,640
		+15	999	1,022	0,6088	0,6130	0,6486
	Рассол	+15	1 070	1,032	—	0,6133	0,6491
		+15	1 140	1,061	0,6083	0,6132	0,6519
		+15	1 190	1,093	0,6088	0,6135	0,6520
-14	1 198	1,36	0,6115	0,6178	0,6612		
123	Вода	+40	992	0,942	0,6127	0,6189	0,6580
		+15	999	1,022	0,6149	0,6201	0,6661
	Рассол	+15	1 070	1,032	—	0,6224	0,6677
		+15	1 140	1,061	0,6134	0,6223	0,6717
		+15	1 190	1,093	0,6122	0,6221	0,6705
-14	1 198	1,36	0,6172	0,6281	0,6827		

в то время, как сопло не так легко изготовить. Как известно, установка сопла имеет целью получить чистую круглую струю, составленную из параллельных водных нитей, без всякого сжатия струи, т. е. сечением, равным отверстию. Поэтому внутри отверстия струя не должна отделяться от стенки сопла, вследствие чего радиус кривизны, образующей отверстие кривой, нигде не должен быть таким малым, чтобы центробежная сила движущихся по кривому пути краевых струек вызывала это отставание. Это легче наступает при низком давлении, чем при высоком, и при горячей воде легче, чем при холодной. Следовательно, здесь существенное значение имеет самая тщательная токарная обработка, дающая профиль без острых краев. Накладки с неудовлетворительно выполненными внутренними очертаниями дают неполное сжатие, в результате чего и получаются совершенно ненадежные соотношения. Сжатие, как правило, должно быть либо полным либо его вовсе не должно быть.

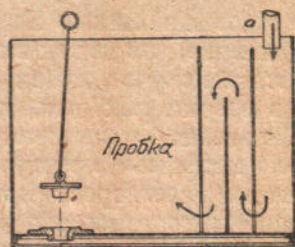


Рис. 172. Переносной измерительный сосуд (Данаида) с отверстием для вытекания.

Большая высота напора является желательной, так как при измерении высоты напора всегда допускается одинаковая неточность, вследствие чего погрешность отсчета при значительных напорах становится относительно меньшей. Помимо того, высота напора изменяется с квадратом вытекающего количества: $V = \alpha \cdot f \sqrt{2gh}$. Поэтому изменение высоты напора с вытекающим количеством будет тем значительнее, чем больше сама высота напора. Наконец, рис. 171 указывает, что при больших напорах коэффициент истечения более постоянен, чем при малых. И наоборот, при малых скоростях отсчитываемая высота напора весьма незначительна, поэтому отсчитывается неточно. При боковом истечении жидкости высота напора исчисляется от середины отверстия. Высота напора измеряется погружаемым масштабом и отсчет производится с точностью до половины или десятой части сантиметра.

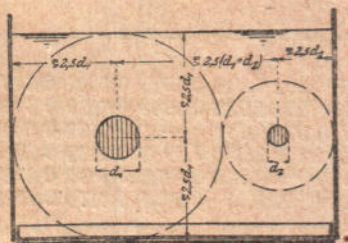


Рис. 173. Минимальные размеры для устройства отверстий истечения.

Можно также пользоваться крючковым измерителем, описанным при измерении с запрудами (рис. 167) или водомерным стеклом со шкалой. В последнем случае следует соблюдать осторожность, если приходится иметь дело с горячей или очень холодной жидкостью. Например, для рассола при температуре -5° погрешность равнялась бы $\frac{2}{3}\%$, если рассол находится в водомерном стекле при $+15^\circ$ и если разница удельных весов не учитывается поправкой. Поправка должна распространяться на высоту столба в водомерном стекле, которая вовсе не должна быть равной высоте жидкости над отверстием истечения. Кроме того, ширина трубки должна быть достаточно большой, чтобы влияние капиллярности было незаметным. В общем, наблюдаемая высота жидкости должна быть перечислена на высоту столба с плотностью протекающей жидкости. При колеблющихся количествах истечения можно пользоваться методом Брауера, применяемым для истечения из многих отверстий, где все они находятся в одинаковых условиях, особенно в отношении напора (Л.). Тогда отдельные вытекающие количества относятся как поперечные сечения отверстий или во всяком случае как произведения $\alpha \cdot f$, т. е. при всех высотах напора остаются пропорциональны друг другу, если отверстия равны друг другу, или когда, согласно рис. 171, самое малое имеет минимальный диаметр 30 мм. Количество, вытекающее из одного отверстия, измеряется, например, путем взвешивания. Таким путем можно измерять большие количества небольшими измерительными приборами, аналогично с применением правила смешения (§ 55).

Также применяются несколько отверстий с тем, чтобы, закрывая то или иное, подобрать общее остающееся поперечное сечение отверстий для получения хорошо отсчитываемой высоты напора. С другой стороны, большое отвер-

стие трудно было бы проградуировать, вследствие чего градуируют несколько малых отверстий, если не считают достаточными данные Шнейдера. Таким образом, общее истечение является суммой отдельных истекающих количеств. Отверстия не должны быть расположены вплотную друг к другу, чтобы взаимные влияния оставались незначительными. Отверстия не должны находиться также вблизи дна или боковой стены резервуара для истекающей жидкости. Каждое отверстие для свободного истечения жидкости (рис. 173) должно иметь вокруг себя поле, равное двух- или трехкратному диаметру отверстия. Если по особым соображениям насадку помещают в дне резервуара, то вычисление высоты напора производится согласно рис. 174, 175. Для таких случаев нет достаточных количественных данных в отношении открытых резервуаров, поэтому лучше избегать такого расположения насадок.

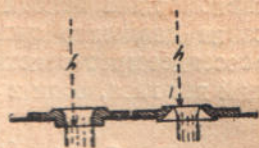


Рис. 174 и 175. Отверстия для истечения воды и измерения высоты напора.

§ 74. Истечение газа из резервуара. При истечении газа из резервуара измеряется избыточное давление $p_1 - p_2 = \Delta p$ кг/м², которое пересчитывается на газовый столб; согласно § 25, $h = \Delta p / \gamma$ м, если γ кг/м³ — удельный вес истекающего газа. Тогда теоретическая скорость истечения равна:

$$v = \sqrt{2g \cdot \Delta p / \gamma} \text{ м/сек};$$

при коэффициенте истечения α объем протекающего количества будет равен

$$V = \alpha \cdot f \sqrt{2g \Delta p / \gamma} \text{ м}^3/\text{сек} \quad (4)$$

и вес истекающего количества

$$G = \alpha \cdot f \sqrt{2g \Delta p \cdot \gamma} \text{ кг/сек} \quad (5)$$

Все, что изложено по вопросу измерения жидкостей, применимо также и к газам как в смысле значения и определения α , так и относительно применения диафрагмы и сопла. Указанные равенства действительны для газа и пара, однако при том условии, что речь идет исключительно о сравнении разностей давления, очень незначительных по отношению к абсолютному давлению. Необходимость этой оговорки следует еще из того, что уменьшение давления с p_1 на p_2 вызывает изменение γ , и тогда указанные равенства теряют свой определенный смысл, как только перепад давления становится заметным. Принципиально необходимо вводить в равенства удельный вес γ , с которым сопряжена скорость v . Необходимо также знать температуру и давление струи. Давление струи, при сравнительно небольших перепадах, становится равным внешнему давлению b , т. е. барометрическому давлению. Но температуру струи нельзя считать равной температуре начального состояния газа, от которой, впрочем, конечная действительная температура t_2 , согласно законам истечения газов, отличается только охлаждением вследствие эффекта Томсон-Джауля, т. е. практически почти не отличается. Однако, струя будет холоднее потому, что после того, как ее кинетическая энергия рассеялась и превратилась при этом в тепло, остается незначительное добавочное охлаждение вследствие эффекта Томсон-Джауля. Но измерения в струе довольно затруднительны, порою бывают даже невозможны потому, что термометр, погруженный в струю, вследствие трения, производимого последней, нагревается до температуры, превышающей действительную температуру струи. Надежнее будет предположение, что явления в струе протекают адиабатически. Этим объясняется обыкновение вводить для γ в формулах (4) и (5) ее значение γ_1 для начального состояния газа, как вполне определенную и надежно измеряемую величину. Обоснование этого дается также в дальнейшем.

§ 75. Большие перепады давления в газах и парах; поправка на расширение ϵ . При более значительных перепадах давления истечение газов и паров представляет уже не механический, а одновременно термодинамический процесс. Можно удобно получать более значительные потери давления, если использовать компрессор для опыта. Тогда воздух можно измерять на всасывающей

линии, но это повлияло бы на важный для компрессора коэффициент подачи. Поэтому лучше устроить отверстие за компрессором; в поршневом компрессоре необходимо промежуточное включение воздушного резервуара, чтобы сделать равномерным исходящий поток. В этом случае измеряемая разность давлений равна давлению сжатия компрессора. Из пространства с давлением p_1 кг/м² в соседнее пространство с давлением p_2 кг/м² вытекает через отверстие f м² следующий вес газа, если $\chi = c_p/c_v$:

$$G = f \cdot \sqrt{2g \cdot p_1 \cdot \gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{\chi}{\chi-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\chi} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(x+1)/\chi} \right]} \text{ кг/сек.} \quad (6)$$

Эта формула Сен-Венана и Вантцеля (наиболее ясный вывод см. у Цейнера: «Техническая термодинамика», т. 1, стр. 233, а также Шюлле: «Термодинамика», стр. 188) дает для:

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{кр} = \left(\frac{2}{\chi+1} \right)^{\chi/(\chi-1)} = K_1 \quad (7)$$

наивысшее значение:

$$G_m = f \cdot \sqrt{2g \cdot p_1 \cdot \gamma_1} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{\chi+1} \right)^{2/(\chi-1)} \cdot \frac{\chi}{\chi+1}} = K_2 \cdot f \cdot \sqrt{2g \cdot p_1 \cdot \gamma_1} \quad (8)$$

Таблица 11

	Насыщенный пар $\chi=1,135$	Горячий пар $\chi=1,3$	Двухатомный газ $\chi=1,4$	Одноатомный газ $\chi=1,65$
K_1	0,57743	0,54573	0,52828	0,48951
K_2	0,44943	0,47183	0,48418	0,51179

Следовательно, каждому давлению p_1 соответствует критическое отношение давлений $\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{кр}$ или критический перепад давления $(p_1 - p_2)_{кр} = \Delta p_{кр}$. Формула (6) действительна для перепада от $\Delta p = 0$ до $\Delta p = \Delta p_{кр}$. При $\Delta p > \Delta p_{кр}$ математически необходимо уменьшить вес G по формуле

(6); в действительности вытекающее количество получает тогда физически максимальное значение, согласно формуле (8), по которой избыток энергии, соответствующий большому давлению, превращается в колебания. Эти отношения имеют свое обоснование в расширении, испытываемом газом, когда давление уменьшается с p_1 до p_2 . Расширение не входит в расчет формул (4) и (5), каковые и применимы лишь для очень незначительной потери давления. Формула (6) неудобна для расчетов и к тому же дает неточные результаты, если не применяют семизначных логарифмов, так как оба показателя степени, а отсюда оба члена разности под корнем мало разнятся друг от друга. Вместе с тем формула (6) не является наглядной и не дает возможности выявить влияние расширения, согласно более простой формуле (5). Поэтому, формулу (6) мы заменяем следующей эмпирической формулой. Числовой расчет дает для

$$\frac{G}{G_m} = \sqrt{\frac{\chi}{\chi-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\chi} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(x+1)/\chi} \right]} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{\chi+1} \right)^{2(\chi-1)} \cdot \frac{\chi}{\chi+1}} \quad (9)$$

кривые (рис. 176), в которых абсциссами являются отношения $\frac{p_2}{p_1}$. Эти кривые по своей форме очень похожи на эллипсы, которые при определенном масштабе превращаются почти в четверти круга; каждая из них особенно была бы похожа на круг если бы ввести абсциссу с величины $(p_2/p_1)_{кр}$ до равной по масштабу высоте диафрагмы; тогда каждая из кривых оказалась бы заключенной в квадрат. Если при этом построении кривая стала бы точным кругом, то вышеуказанное равенство преобразовалось бы так:

$$\left(1 - \frac{\Delta p}{\Delta p_{кр}} \right)^2 + \left(\frac{G}{G_m} \right)^2 = 1; \quad (10)$$

Если по точной формуле (9) для разных значений $\Delta p/p_{кр}$ определить значения G/G_m и составить (по уравнению 10) сумму квадратов, то вместо единицы будем иметь величины, представленные на рис. 177. Максимум отклонений квадратов членов формулы 10 при этом получается в $2^0/00$ (при измерении воздуха). Таким образом сама величина при использовании формулы (10) вместо (9) отклоняется следовательно — на $1^0/00$ от действительной величины. Отсюда имеем:

$$G \approx G_m \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\Delta p_{кр}} \left(1 - \frac{\Delta p}{2 \cdot \Delta p_{кр}}\right)}, \quad (11)$$

которая является хорошей приближенной формулой для замены громоздкой формулы (6).

В формуле (11) первый член под корнем дает простое корневое соотношение между G и Δp , сравнение с формулой (5) здесь интереса не представляет; это приводит к $K_2 \approx \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (1 - K_1)}$, что дает численно подходящее значение.

Величина, заключенная в скобках, является поправкой, которую необходимо вносить в простое корневое соотношение (5), если относительный перепад давления $\Delta p/p_1$ превышает определенную величину, так что истечение газа больше нельзя рассматривать, как чисто механический про-

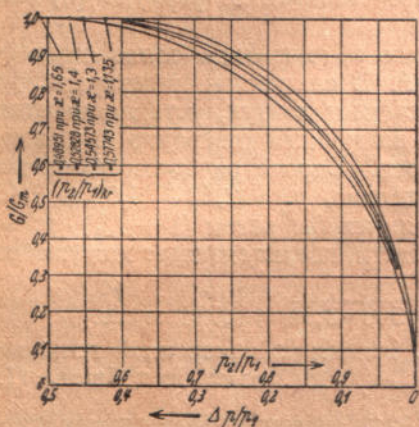


Рис. 176. Точные величины истекающего количества в зависимости от соотношений давления.

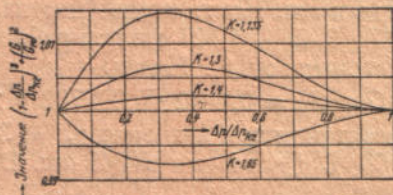


Рис. 177. Отклонения кривых рис. 176 от эллипса.

цесс, но как процесс, который должен быть изучен термодинамически. Тогда можно написать формулу:

$$G = \varepsilon \cdot \alpha \cdot f \sqrt{2g \cdot \Delta p \cdot \gamma_1}, \quad (12)$$

в которую вносят, по сравнению с формулой (5), поправку на расширение. Одновременно получается возможность пользоваться при расчетах значениями γ_1 , полученными при измерении перед местом отбора, в то время как прежде эти промеры нужно было производить в струе. Величина ε равна:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{\Delta p}{2 \cdot \Delta p_{кр}}}$$

и поскольку Δp меньше $2\Delta p_{кр}$, т. е. дробь $\frac{\Delta p}{2\Delta p_{кр}}$ меньше единицы, ε приближенно равно:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta p}{4 \cdot \Delta p_{кр}} \quad (13)$$

или для определенного вещества с известным значением $\frac{p_1}{\Delta p_{кр}}$

$$1 - \varepsilon = \frac{1}{4} \cdot \frac{p_1}{\Delta p_{кр}} \cdot \frac{\Delta p}{p_1}. \quad (14)$$

Таким образом у определенного вещества и при определенном p_1 величина $1 - \varepsilon$ пропорциональна перепаду давления Δp , поскольку речь идет о поправке. Например, для воздуха с соотношением $\frac{\Delta p_{кр}}{p_1} = 1 - K_1 = 0,47172$ и для перепада давления $\Delta p = 0,01 p_1$, величина $1 - \varepsilon = \frac{1}{4} \cdot \frac{0,01}{0,47172} = 0,0053$.

Из таблицы 14 видно, что при закругленном нормальном сопле и $\alpha = 1,4$, значение $1 - \varepsilon = 0,0055$ предельное, к которому $1 - \varepsilon$ стремится, когда m становится равным нулю, т. е. когда сопло мало по сравнению с пространством, из которого воздух истекает. Для нормальной диафрагмы с острыми гранями это предельное значение, во всяком случае, значительно меньше и равно, примерно, 0,002. Таким образом объясняется поправка на расширение, имеющаяся в «Правилах для измерения потока (Л.)». Согласно опытных данных, учтенных этими правилами, можно при истечении газа из сосуда, если измеряемое давление не слишком низко, пользоваться формулой (12). Для воздуха в этой формуле подставляют следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0,985; \quad \varepsilon = 1 - 0,55 \frac{\Delta p}{p_1} \text{ для закругленного сопла} \\ \alpha &= 0,595; \quad \varepsilon = 1 - 0,22 \frac{\Delta p}{p_1} \text{ для диафрагмы с острыми} \\ &\hspace{15em} \text{гранями.} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Для больших перепадов давления расчет производится по формуле (6) или (11).

Пример. Компрессор работает на хорошо закругленное сопло диаметром в 29,9 мм, т. е. площадью $f = 0,000702 \text{ м}^2$. В воздушном резервуаре, на который компрессор работает и из которого истекает воздух, устанавливается давление $\Delta p = 2,43 \text{ ат}$ избыточного давления; воздушный резервуар выравнивает прерывистую подачу воздуха компрессором. Барометрическое давление в 750 мм ртутного столба = 1,02 ат, следовательно, $p_1 = 2,43 + 1,02 = 3,45$ абсолютных ат. Критический перепад давления был бы равен $(1 - K_1) \cdot p_1 = 0,4717 \cdot 3,45 = 1,627 \text{ ат}$ при работе в той области, где истекающее количество зависит только от p_1 . Имеем:

$$G = G_m = 0,4842 \cdot 0,000702 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 34\,500 \cdot 3,51} = 0,524 \text{ кг/сек.}$$

Здесь подставляется значение $\gamma_1 = 3,51 \text{ кг/м}^3$, исходя из измеренной температуры в 63° С и давления в 3,45 ат. Величина $K_2 = 0,4842$ взята из таблицы 11.

Можно также указать, что $V_0 = 0,405 \text{ м}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{сек}$. Результат вычисления следует указать не более чем в трех цифрах, так как заданное значение диаметра сопла — число из трех цифр.

Пример. Тем же соплом испытывается воздухоудка. Избыточное давление $\Delta p = 0,462 \text{ ат}$. Барометрическое давление 1,02 ат, так что $P_1 = 1,482 \text{ ат}$; ему соответствует критическое давление $\Delta p_{кр} = 0,698 \text{ ат}$. В данном случае на количество оказывает влияние также противодавление. Пусть измеренная температура 38° и $\gamma_1 = 1,628 \text{ кг/м}^3$. Тогда $G_m = 0,234 \text{ кг/сек}$. Но здесь $\Delta p : \Delta p_{кр} = 0,462 \cdot 0,698 = 0,661$, откуда (по формуле 11):

$$G = G_m \cdot \sqrt{2 \cdot 0,661 \cdot 0,670} = 0,942 \cdot G_m = 0,220 \text{ кг/сек.}$$

Эти примеры вычислены при $\alpha = 1$; отверстие необходимо выверить, в противном случае надо взять значение $\alpha = 0,985$, вследствие чего получим для истекающего количества соответственно меньшее значение.

§ 76. Измерение протекающих количеств. Если дроссельные устройства (диафрагма, сопло или также труба Вентури, § 79) вставлены не в плоскую стену большого протяжения, но в трубопровод, как это показано на рис. 178, то условия измерения во многих отношениях изменяются. В этом случае в сжатом сечении дросселя скорость v уже не возникает из скоростной высоты, но начальная скорость v_0 только увеличивается до v . Затем, позади отверстия скорость снова уменьшается с v до v_0 , так что в конечном счете не остается никакого изменения в скорости протекания. Тем не менее потеря энергии остается в виде потери давления вследствие того, что возрастание скорости в измерительной диафрагме обратимо, тогда как последующее уменьшение этой скорости, возникающее вследствие толчков, необратимо и согласно Карно происходит расход энергии на удары. Труба Вентури, благодаря своему плавному коническому расширению, представляет средство приблизить условия метода измерения к теоретически обратимым и тем избежать существенных потерь энергии.

При пользовании диафрагмой с острыми гранями сжатие выходящей струи, кроме того, становится неполным. Коэффициент сжатия μ для очень малого отно-

шения площадей отверстий $f : F = m \sim 0$ имеет значение $\mu_0 \sim 0,61$; эта величина μ повышается до единицы, при отношении площадей отверстий $m = 1$; в гладких трубах сжатие вовсе не имеет места.

Мерилом сжатия является отношение площадей отверстий $m = \frac{f}{F} = \frac{d^2}{D^2}$ из которых f и d относятся к дроссельному прибору, F и D — к трубопроводу, так что m является правильной дробью. Измеряемое согласно рис. 178 манометром действующее давление

$p_1 - p_2 = \Delta p$ служит по закону сохранения энергии для повышения начальной скорости с v_0 до $v = \frac{v_0}{\mu m}$, поэтому (Л. 179)

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{v^2}{2g} - \frac{v_0^2}{2g},$$

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{1 - \mu^2 m^2}{\mu^2 m^2},$$

$$v_0 = \frac{\mu m}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \cdot \sqrt{2g \frac{\Delta p}{\gamma}},$$

Рис. 178. Измерение истекающего количества помощью диафрагмы и изменения давления в последней.

и количество, протекающее в установке с поперечным сечением F (M^2), равно

$$V = F v_0 = \alpha \cdot m F \sqrt{2g \cdot \Delta p / \gamma_1} \quad M^3 / \text{сек}, \quad (16)$$

где

$$\alpha = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}. \quad (17)$$

Эта формула, правда, ничего не дает, кроме подтверждения наличия квадратичной зависимости между V и p ; так как коэффициент сжатия μ здесь неизвестен, то ограничиваются определением α из опыта. Ранее мы по найденным опыт-

ным путем значениям α судили о величине сжатия и нашли, что $\mu = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + m^2 \alpha^2}}$

изменяется непрерывно от 0,61 до 1, в то время как α превышает 1; при m равном единице $\alpha = \infty$ (рис. 179 Л.). В указанную формулу подставляется давление, господствующее в сжатой струе, сопряженное со скоростью $v = v_0 / \mu m$ как давление p_2 . Его можно определить опытным путем, измерив в углу между кожухом трубы и диафрагмой или соплом. За местом наивысшей скорости струя, вследствие завихрения ее медленнее текущей жидкостью, рассеивается в трубе, пока общий поток вновь не приобретает однообразной (в среднем) для поперечного сечения трубы скорости v_0 . Полное давление p_1 при этом не восстанавливается, так как изменению скорости за счет давления в данном случае сопутствует образование вихрей. При этом получается только давление $p'' < p_1$. Если не принять во внимание собственно потери трения о стенку трубы, то учитывая при выводе остающуюся потерю давления от удара струи о более медленное течение в трубопроводе, имеем:

$$\frac{p_1 - p''}{\gamma} = \frac{(v^2 - v_0^2)}{2g} = \frac{v_0^2 (1 - \mu m)^2}{2g \cdot \mu^2 m^2}.$$

Откуда следует, что

$$V = F \cdot v_0 = \alpha'' \cdot m F \cdot \sqrt{2g \frac{p_1 - p''}{\gamma}}, \quad (18)$$

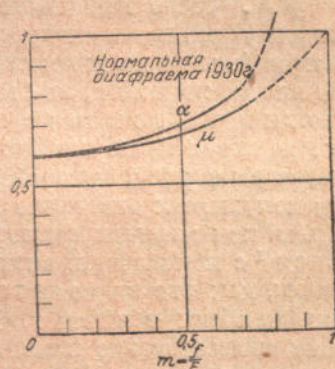


Рис. 179. Коэффициент истечения α и коэффициент сжатия μ для нормальной диафрагмы.

где

$$\alpha'' = \frac{\mu}{1 - \mu m}$$

Остающуюся потерю давления можно было бы также использовать для измерения количеств, но для этого необходимо было бы измерять p'' далеко за дроссельным прибором (примерно, 8D). Поэтому, этот способ не применяется, так как при таком положении места измерения трение в трубе заметно влияет на результат измерения; вместе с тем, при таком способе измерения давления, действующее давление уменьшалось бы. Формулы (19) и (20) указывают, что дробная часть формулы (18) для действующего давления

$$\frac{p_1 - p''}{p_1 - p_2} = \frac{(1 - \mu m)^2}{1 - \mu^2 m^2} = \frac{1 - \mu m}{1 + \mu m} \quad (19)$$

постоянно теряется. Если на этом основании произвести сравнение сопла и диафрагмы, то получим следующие данные:

нормальное сопло с величиной

$m =$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
даст	0,905	0,82	0,67	0,54	0,43	0,33

измерительного давления, как остающуюся потерю давления; нормальная же диафрагма, как изображено выше, при таком же измерительном давлении, дает: нормальная диафрагма с величиной

$m =$	0,084	0,161	0,313	0,450	0,572	0,689
даст	0,925	0,825	0,68	0,55	0,44	0,345

измеряемого давления, как остающуюся потерю давления. Как видно из приводимых данных, оба дроссельных прибора, в отношении остающихся потерь давления, приблизительно равноценны. Впрочем, у диафрагмы остающаяся потеря давления всегда равна $(1-m)$ -ой части измерительного давления. Для производства остающаяся потеря давления является накладным расходом; это нежелательно потому, что при более малых отверстиях от более сильных действующих давлений теряется более значительная дробная часть давления.

§ 77. Число Рейнольдса. Отсутствие трения является предельным условием, которому реальные жидкости удовлетворяют лишь в большей или меньшей степени (вязкие же жидкости совершенно не удовлетворяют). Опыт показывает, что вязкие жидкости, как масло или сироп, очень мало или совершенно не сжимаются и что даже менее вязкие жидкости, как например, вода, дают полное сжатие струи лишь при достаточной скорости движения. Явление сжатия есть действие инерции, которой подвержены все струйки, притекающие со всех сторон полушара к отверстию диафрагмы, и эта инерция, естественно, проявляется только при наличии скорости. Таким образом коэффициент сжатия увеличивается ¹ с повышением вязкости ν $M^2/сек$ и уменьшается с увеличением скорости v $M/сек$, как это видно из таблицы 10. Но учение о подобии утверждает, что отношение обеих величин v/ν является решающим для процессов истечения. Поэтому целесообразно приводить эмпирически определенную величину α в соответствие с числом Рейнольдса. Процессы истечения характеризуют помощью числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{L \cdot v}{\nu}, \quad (20)$$

которое представляет отношение силы инерции к силе вязкости. Большое число Рейнольдса означает преобладание в процессе сил инерции; при малом числе преобладают силы вязкости. Эти последние вводятся или как кинематическая вязкость ν $M^2 \cdot сек^{-1}$, или как динамическая вязкость η $кг \cdot сек \cdot M^{-2}$; оба эти вида вязкости связаны между собой равенством $\nu = \frac{\eta \cdot g}{\gamma}$. Значения η указываются в справочных таблицах вместо ν , потому что меньше изменяется

¹ Т. е. самое сжатие уменьшается.

с состоянием вещества, а у газов она не изменяется и с давлением. L означает какой-нибудь из линейных размеров, которому должны быть пропорциональны все другие линейные размеры, если по одинаковому значению Re желают по закону подобия вывести заключение об одинаковом условии потока. Если, следовательно, опытным путем определен коэффициент истечения α для диаметра трубы $D = 100$ мм и диаметр диафрагмы $d = 50$ мм, то можем утверждать, что можно было бы пользоваться при вычислении одинаковым значением коэффициента истечения при $D = 300$ и $d = 150$, если бы большая диафрагма геометрически была подобна малой диафрагме, — т. е. каждое измерение было бы в три раза больше другого и если при одинаковой жидкости, следовательно, при одинаковом значении ν , скорость v была бы равна по величине $1/3$, так как в этом случае Re имеет ту же самую величину (Л). Итак, по закону подобия требуется, чтобы для каждого отношения диаметров $d/D = \sqrt{m}$ был произведен ряд опытов при изменяющейся скорости v с любым веществом при любом состоянии, характеризуемом величиной ν ; и, если полученные результаты нанести на графики в зависимости от величин Re , то можно утверждать, что можно было бы применить одинаковое значение коэффициента истечения k для любого другого вещества и для любого большего — но подобного — дроссельного прибора с одинаковым отношением диаметров. Величину α можно найти по графику под соответственным значением числа Рейнольдса. Опыты показывают, что эта ссылка на число Рейнольдса приводит к точным результатам. На рис. 180 указаны результаты такого испытания, полученные в насадке с величиной $m = 0,4$ и в диафрагме с величиной $m = 0,57$. Оба дроссельных прибора при равных количествах дают одинаковую потерю давления. Оказывается, что значение α в широких пределах не зависит также от величины

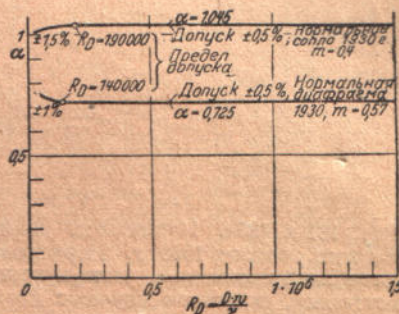


Рис. 180. Коэффициент истечения для нормального сопла и нормальной диафрагмы при равных перепадах давления.

$$R_D = \frac{D \cdot v}{\nu}. \quad (21)$$

Коэффициент истечения при пользовании диафрагмой повышается только при очень незначительных величинах R_D , при насадках же — понижается; это имело бы также место при малых скоростях или при большой вязкости или при малом диаметре трубы D . Индекс D , находящийся при R , означает именно, что (по правилу Л.) в качестве линейного размера, к которому относится R , принят диаметр трубы D (м); этот выбор произвольный и можно было бы в частности принять также диаметр отверстия d (м), отчего $R_d = \sqrt{m} \cdot R_D$ стало бы соответственно меньше. Это не имеет значения, так как всегда речь идет лишь о том, чтобы при пользовании добиваться той же величины, на которой базировалось основное испытание.

Итак, в широких пределах число Рейнольдса фактически не играет никакой роли; необходимо только убедиться в том, не работают ли выше допустимого предела. В местах искривления кривой, изображенной на рис. 180, измерение менее надежно, чем на прямолинейных участках кривой. Поэтому по правилам в искривленных частях линии разрешается более высокий допуск. Впрочем, было установлено, что результаты испытания можно распространить с одной жидкости на другую а также с жидкостей на газы и пары. При заданном измерении L , коэффициент истечения в данном случае определяется только значением ν/ν числа Рейнольдса. Так например, для воды в 50° определено (Hütte 26, т. I, стр. 354), что $10^6 \eta = 58$, т. е. что $\eta = 58 \cdot 10^{-6}$, соответственно $\nu = 0,58 \cdot 10^{-6}$. Соответственно находят для любого вещества, находящегося в любом состоянии, что у воды при 50° — $\nu = 0,58 \cdot 10^{-6}$, при этом ν пусть 2 м/сек. У воздуха при 20° $\nu = 14,9 \cdot 10^{-6}$, следовательно должно быть $\nu = 51$ м/сек.

У насыщенного пара при $5 \text{ ат} — \nu = 6,1 \cdot 10^{-6}$, следовательно $v = 21 \text{ м/сек}$, тогда во всех трех случаях $v/\nu = 3,4 \cdot 10^6$ и эти три вещества, при протекании через дроссель, равноценны. Для них в трубопроводе, диаметром $D = 0,3 \text{ м}$, число Рейнольдса $R_D = 1,03 \cdot 10^6$.

§ 78. Нормы для датчика измерительной разности давления. Остается еще несколько подробнее остановиться на «Правилах для измерения расхода (Л.)». Они предусматривают применение нормального сопла и нормальной диафрагмы, изображенных на рис. 181 и 181а. Давление отбирается в месте соединения дросселя с цилиндрической оправой посредством кругового прореза или отверстия, соприкасающихся с напорной стеной; отверстия должны быть размером $\leq 0,03D$, иначе нельзя точно измерить действующее давление. Однако, при пользовании

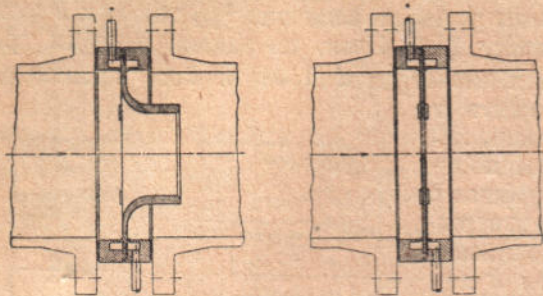


Рис. 181 и 181а. Нормальная диафрагма и нормальное сопло 1930 г. Нормированными являются заштрихованные части и места отбора для истечения, в данном случае с кольцевыми каналами (правила рис. 3 и 6).

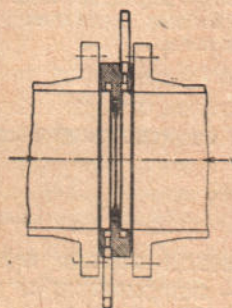


Рис. 182. Диафрагма для проточа в обе стороны; ненормировано. Германской фирмы «Бэме».

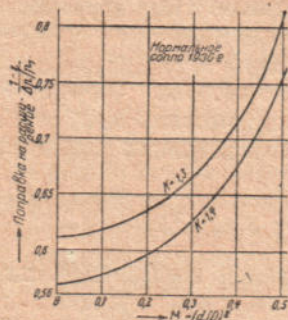


Рис. 183. Поправка на расширение для газов и паров для нормального сопла (правила рис. 17 и 18).

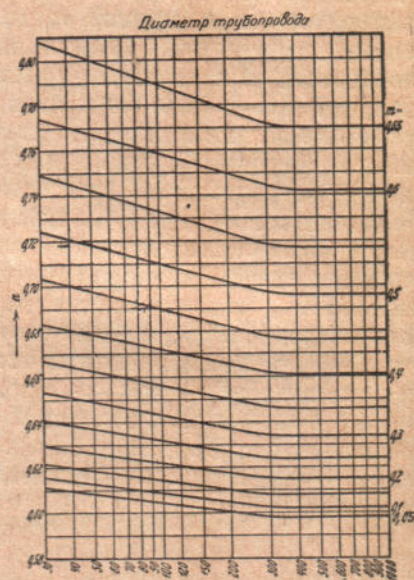


Рис. 184. Коэффициенты истечения нормальных диафрагм нормального промышленного изготовления в нормальных необработанных трубах свыше допусков согласно таблицы 13 (правила, рис. 20).

заборными отверстиями, диаметром ниже, примерно, 8 мм, могут возникнуть некоторые затруднения по крайней мере при измерении количества пара, потому что в отверстиях остаются капли (сконденсированного пара). Благодаря наличию капиллярных сил требуются значительные разности давления, чтобы выжать эти капли, а это вносит ошибку в измерения; в таких случаях лучше применим отбор прорезом (пункт 31). Сопло должно быть гладким, форма его должна быть проверена помощью шаблона; диаметр сопла измеряется с точностью $\pm 0,001 d$ (пункт 25). Диафрагма должна иметь острую грань лишь с легким закруглением и гладкой лобовой поверхностью, диаметр диафрагмы должен измеряться с точностью $\pm 0,001 d$ (пункт 25). Если при помощи такого устройства правильно определена разность давлений $\Delta p \text{ кг/м}^2$, то вес протекающего количества

$$G = \alpha \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \sqrt{2g\gamma_1 \cdot \Delta p} \text{ кг/сек.} \quad (22)$$

$$V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot f \sqrt{\frac{2g}{\gamma_1} \cdot \Delta p} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (23)$$

где α и ε имеют значения (с определенными оговорками), указанные в таблицах 12—14 и на рис. 183—185, которые в существенном основуются на опытах в Опшау, которые со времени их опубликования много раз были проверены и обсуждены и, наконец, приняты как международные нормы; поправочный коэффициент на расширения ε для жидкостей равен 1 (Л.) При этом сохраняются условия относительно α о том, что число Рейнольдса имеет, по крайней мере, вышеприведенные величины, иначе α у сопла будет меньше, а у диафрагм больше; относительно ε — условие, что $\Delta p/p_1$ должно быть $\geq 0,2$. Перед и после дроссельной установки труба должна быть прямой и свободной от мешающих явлений, возникающих при поворотах трубопровода; на таблице 15 даны размеры прямого участка трубы в различных случаях. Указанный на рис. 197 регулятор струи может внести улучшение.

(Допуски указаны также в изложенных выше нормах, как это видно из таблиц 12—15). При сравнительной оценке сопла и диафрагмы необходимо считаться с нижеследующим: у диафрагм область постоянного коэффициента истечения распространяется до более низких чисел Рейнольдса, что особенно важно для установленных для стационарной работы дроссельных приборов со счетным механизмом, применяемых для производственного контроля; кроме того, диафрагма, естественно, значительно легче для установки. Сопло и диафрагма, установленные в одинаковом трубопроводе, при одинаковом потоке, дают одинаковое измерительное давление, если величины $m\alpha$ в обоих случаях одинаковы. Поэтому, следующие диафрагмы и сопла равноценны друг другу (также в отношении постоянной потери давления):

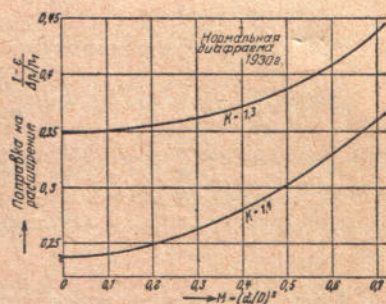


Рис. 185. Поправка на расширение для газов и паров к рис. 184 (правила, рис. 17 и 18).

Нормальные сопла							
с величиной	$m=0,05$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
равноценны нормальным диафраг-							
мам с величиной	$m=0,084$	0,161	0,313	0,450	0,572	0,689

Правила (№ 27) предъявляют мастерским, изготавливающим диафрагмы, очень высокие требования. Если кромка диафрагмы настолько не острая, что можно наблюдать на ней отражение света, тогда коэффициент истечения при трубах диаметром ниже 100 мм повышается почти до 2%. С другой стороны, внутренняя поверхность трубы должна быть гладкой и правила (№ 48) дают определение гладкости. Чугунная, внутри просмоленная труба диаметром в 200 мм должна рассматриваться как гладкая, пока отношение площадей отверстий будет меньше 0,5. Шероховатой (с точки зрения измерений количеств) будет чугунная труба, заржавленная внутри, вследствие длительного применения, при условии, что внутренняя поверхность последних не покрыта толстой коркой. Все же, чтобы при обычном изготовлении диафрагм в мастерской взаимно скомпенсировать, в широком смысле, влияния умеренно острых граней и шероховатости труб, при поставленных нормальных требованиях, можно принять допуски, указанные на рис. 184.

Эти допуски имеют удобное для общего употребления значение, и так как понятие об острой грани и шероховатости трубы довольно растяжимо, то принимают больший допуск, как величину для самой точно выполненной диафрагмы в гладкой трубе.

Коэффициенты истечения для нормального сопла 1930 г.

Допуск $\pm 0,5\%$.

$m=0,05$ $\alpha=0,987$ для $R_D \geq 60\ 000$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
	0,989	0,993	0,999	1,006	1,016	1,029	1,045	1,066	1,096
	63 000	72 000	85 000	104 000	130 000	155 000	180 000	230 000	280 000

Если R_D меньше заданного, то α становится меньше, а именно для каждого следующего десятичного разряда (до 6000, 6300...) на 4%; допуск равен $\pm 1,5\%$.

Таблица 13

Коэффициенты истечения для нормальных диафрагм 1930 г.

$m=0,05$ для $R_D \geq 20\ 000$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	32 000	49 000	73 000	97 000	125 000	150 000	175 000

со следующими допусками (правила—числовые таблицы 3 и 4 правил)

до $m=$	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
для D от 50 до 100	$\pm 1,5\%$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	± 2
» D от 100 до 200	$\pm 1\%$	± 1	± 1	$\pm 1,5$	± 2
для D от 250 до 300	$\pm 1\%$	± 1	± 1	± 1	$\pm 1,5$
» свыше 300	$\pm 1\%$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$

Если R_D меньше заданного, то α становится больше, а именно около 0,02 при $m = 0,25$ и около 0,04 для значения $m = 0,5$ каждого следующего десятичного разряда.

Таблица 14

Поправка на расширение. Величина $1 - \epsilon$ для каждого перепада давления 0,01 P_1 (для $\Delta p/p_1$ 0,01)

При $m=$	0,05	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7
Для нормального сопла:						
$\alpha=1,3$	0,0060	0,0062	0,0066	0,0073	0,0082	—
1,4	56	53	62	69	77	—
1,65	48	51	54	69	67	—
Для нормальной диафрагмы						
$\alpha=1,3$	0,00335	0,00345	0,00355	0,0037	0,00385	0,0044
1,4	21	22	225	245	275	34

Дополнительные допуски: для нормального сопла в верхнем пределе допуска — нет увеличения; для нормальной диафрагмы при снижении $\Delta p/p_1 = 0$ при допуске до 1% — дополнительный допуск — 0%; свыше 1% до 2% $\pm 0,5\%$; свыше 2% $\pm 1,5\%$ (таблица 2 норм).

По данным таблиц 12—15 можно вычислить те значения α , соответствующих величинам R_D , для которых линии рис. 180 (для сопла идут вниз, для диафрагмы—вверх). В изогнутых частях графическая характеристика выражает поток менее определенно, что нашло отражение в увеличении допуска, как это видно на рис. 180. Точка перехода поэтому называется границей допуска. При расчетах ниже границы допуска можно пользоваться правилами (Л), по-

Необходимый прямой участок труб для правильных показаний давлений

m=	Нормальное сопло				Нормальная диафрагма			
	Перед соплом		После сопла		До диафрагмы		После диафрагмы	
	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
Простое колено (D) . . .	9	15	5	10	8	18	5	5
Двойной поворот в плоскости (D) . . .	6	20	6	27	5	10	5	10
Тройной изгиб в пространстве (D) . . .	20	30	10	27	28	28	5	5
Вентиль (D) . . .	28	60	5	5	28	55	5	5

сколькo примечания к таблицам 12 и 13 не дают исчерпывающих указаний. Новые попытки (Л.) улучшения конструкций сопел и диафрагм сводятся к тому, чтобы найти форму отверстия, для которой предельный допуск лежал бы ниже, чем для нормальных форм, указанных в нормах.

Эти величины даны для случая, когда отверстия для дифференциальных манометров просверлены в трубе. Если отбор давления производится при помощи кольцевого отверстия, то длину трубы можно укоротить на 20%; длина же трубы после диафрагмы должна всегда быть равной 5D. Если участок трубопровода равен половине указанной

длины, то получаемая при измерении расхода погрешность равна $\pm 0,5\%$.

Так как величина α выше границы допуска является постоянной, то необходимо только установить наличие выполненных условий. Если в формуле (21) сопоставить конструктивные свойства дросселя со свойствами жидкости, то граница допуска при $R_D = R'_D$ будет:

$$\nu = \frac{v \cdot D}{R'_D} = \frac{v \cdot \frac{1}{4} \pi D^2}{R'_D \cdot \frac{1}{4} \pi D} = \frac{4V}{R'_D \cdot \pi D'}$$

выше которого необходимо, чтобы

$$V \geq (0,785 \cdot \frac{R_D}{R}) \cdot \nu \quad (24)$$

Величины в скобках $\cdot 10^6$ можно взять из таблицы 16, величины $10^6 \nu$ из таблицы 17 и действительный объем V м³/сек в действительно существующем состоянии должен быть равным, по крайней мере, произведению обоих (Л.).

Таблица 16

Условие нахождения выше границы допуска выполнено, когда протекающий через объем V м³/сек имеет, по крайней мере, указанное значение.

Предельное значение R^1_D можно взять по таблице 12 и 13

D (м)	$R^1_D=20\,000$	40 000	60 000	100 000	150 000	200 000	250 000	300 000
D=0,025	$V \geq 0,62$	1,24	1,86	3,1	4,6	6,2	7,1	$9,3 \times 10^6 \nu$
0,05	0,31	0,63	0,94	1,57	2,4	3,1	3,9	4,7
0,1	0,157	0,31	0,47	0,78	1,17	1,57	1,96	2,4
0,2	0,078	0,157	0,24	0,39	0,59	0,78	0,98	1,18
0,4	0,039	0,078	0,118	0,196	0,29	0,39	0,49	0,58
0,6	0,026	0,052	0,079	0,131	0,195	0,26	0,33	0,39
1,0	0,016	0,031	0,047	0,078	0,118	0,157	0,196	$0,24 \times 10^6 \nu$

Значение $10^6 \nu$ можно взять из таблицы 17.

§ 79. Труба Вентури. Основное преимущество трубы Вентури, как дроссельного прибора перед диафрагмой или соплом заключается в том, что при ее использовании восстанавливается большая часть действующего давления, чем при диафрагме или сопле. При трубе Вентури допускается большее действующее давление, без того, чтобы потеря давления становилась экономически недопустимой (§ 93), поэтому труба Вентури является прибором с более значительной переставляющей силой; или, пользуясь одинаковым указывающим прибо-

ром, мы получаем меньшую потерю давления. Для трубы Вентури характерно соплообразное впускное отверстие, к которому присоединяется длинное коническое расширение; в сопле трубы Вентури совершаются те же процессы, что и в нормальном сопле; точно так же, как и в нормальных дроссельных приборах, в местах с обозначениями + и — производится отбор давлений p_1 и p_2 ; коническое расширение должно быть достаточно плавно, чтобы воспрепятствовать отставанию струи от стенок, поэтому допустимым линейным расширением принято отношение 1 : 10. Вследствие этого длина конического расширения получается значительной, если его постепенно доводят до полного поперечного сечения трубопровода (рис. 186, 187). Применяют также укороченные трубы Вентури (рис. 188, 188а), у которых потеря давления больше. Остающаяся еще потеря давления, вследствие закона квадратичной зависимости, все же меньше, чем можно заключить по рисунку.

Таблица 17

Кинематическая вязкость $10^6 \nu$ м²·сек

Абсолютное давление в атм	Водяной пар				Абсолютное давление в атм	Воздух		
	Насыщенный	200°	300°	400°		0°	50°	100°
1	22,0	35,6	53,0	74,1	1	13,4	18,7	25,3
5	6,08	7,5	11,0	15,0	5	2,68	3,74	5,06
10	3,76	4,05	5,62	7,63	10	1,3	1,9	2,5
20	2,30	—	2,94	3,97	—	в о д а		
40	1,37	—	1,56	2,04	—	1,8	0,57	0,32

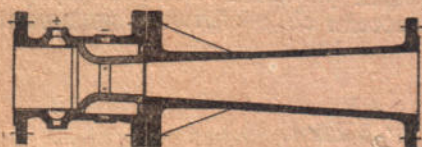


Рис. 186. Труба Вентури фирмы «Бопп и Рейтер».

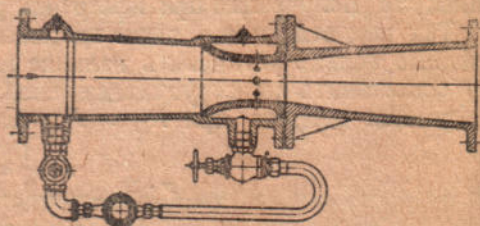


Рис. 187. Труба Вентури фирмы «Сименс и Гальске».

Напорная решетка (рис. 189) как бы разделяет трубу Вентури на рядом лежащие плоские прорезы. Поэтому труба при одинаковом действии может быть короче (Л.).

Так же как и сопло, труба Вентури характеризуется отношением $m = \frac{f}{F} = \left(\frac{d}{D}\right)^2$; для вычисления количеств, протекающих через трубу Вентури, действительны те же зависимости, что и для сопла (Л.). Таким образом, расчеты производятся при помощи числовых данных, применяемых при измерениях нормальными соплами, однако, эти данные для труб Вентури не имеют официального признания, так как они установлены правилами только в отношении сопла; поэтому каждая труба Вентури должна подвергаться проверке.

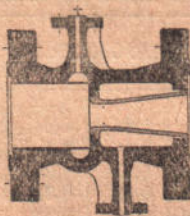


Рис. 188. Укороченная труба Вентури фирмы «Бопп и Рейтер».

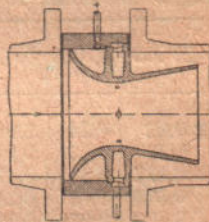


Рис. 188а. Вставка с укороченной трубой Вентури фирмы «Сименс и Гальске».



Рис. 189. Напорная решетка по Е. Шмидту фирмы «Бопп и Рейтер».

В Америке трубы Вентури сиздавня нашли применение (Л.), в Германии они в течение многих лет также служат для измерения подачи воды водопроводными установками (в качестве главного водомера). Труба Вентури применяется также для измерения количеств воздуха и газа. Так, в вентиляционных

установках, прямоугольный канал сделан суженным; измеряемая разность давлений может стать почти равной статическому давлению, производимому вентилятором. Вычисление количеств производится так же, как и для воды. Расширение позади сужения должно быть произведено достаточно плавно. Этот метод с успехом может конкурировать со всеми остальными сплошь неточными методами измерения больших количеств воздуха, если даже можно оценить потери от трения. Все переходы должны быть хорошо закругленными, а сужение не должно начинаться сразу; для надежности измерения потерь энергии необходимо устранить отставание потока от стенок и потери энергии от образования вихрей.

Автор еще в 1903 году наблюдал единичные случаи применения в Америке трубы Вентури для измерения пара высокого давления и сжатого воздуха. Они систематически применяются для этих целей; только в последнее время снова преимущественно применяют нормальные дроссельные приборы.

Для указания перепада давлений и соответствующей этому перепаду величины расхода служит ртутный или водяной манометр любой конструкции. О приборах для интегрирования количеств нами было уже сказано в § 16 (рис. 47 и след.). Цель применения трубы Вентури



Рис. 190. Мультипликатор разрежения Рато фирмы «Кюле, Копп и Кауш».

может быть еще в большей степени достигнута помощью мультипликатора разрежения Рато (рис. 190). По сравнению с давлением в поперечном сечении d , в сечении до точки a образуется обычное для трубы Вентури разрежение. Давление восстанавливается в поперечном сечении o . На участке

между d и a устанавливается вторая труба Вентури, в которой существует соответственно более сильная скорость воздуха, вследствие чего в суженном ее поперечном сечении наступает разрежение во много раз более сильное по сравнению с давлением в d , вновь усиливающееся на участке от d до b , являющееся не вполне оформленной трубой Вентури; в сужении c трубы тогда и производится измерение, при котором в большинстве случаев можно пользоваться обыкновенным манометром. Такие мультипликаторы разрежения устанавливаются, например, на всасывающей линии вентиляторов и в данном случае указывают подачу ими воздуха, которая на практике ошибочно называется мощностью. Название — мультипликатор мощности — для указанного на рис. 190 устройства является вдвойне ошибочным, так как понятно, что подача воздуха (мощность) последним но увеличивается, но только более отчетливо выражено (Л.). Аналогичные устройства из жести грешат недостаточной округленностью краев и происходящими вследствие этого явлениями отставания струи от стенок.

Другим преимуществом трубы Вентури по сравнению с соплом и диафрагмой является ее нечувствительность к возмущениям, возникающим до места его установки. При отношении площадей отверстий $m = 1/4$ или меньше изгиб не имеет никакого влияния (Л.).

§ 80. Измерение количеств воды методом давления и времени. По предложению Гибсона (Л.) можно определить протекающее через турбинную установку количество воды путем закрытия шибера и измерения происходящего от этого повышения давления. Передвижение шибера и повышение давления, измеряемого посредством чувствительного прибора, должны регистрироваться в функции времени, откуда уже можно определить количество воды, протекающей до закрытия шибера.

VII. СЧЕТЧИКИ ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВ (РАСХОДОМЕРЫ)

§ 81. Обзор. Перечисленные до сих пор методы измерения количеств как твердых, т. е. преимущественно сыпучих тел, так и жидких и газообразных, применяются для однократного измерения при определении количеств вещества. По мере того, как выяснилось, что достижение экономной эксплуатации производства можно только путем длительно проводящегося наблюдения производственных и тепловых процессов, возникло стремление создать такие приборы, которые автоматически, без специального присмотра, производили бы измерение количеств и в то же время давали бы возможность отсчитывать все количество вещества, прошедшее в течение целой рабочей смены или даже за более продолжительный промежуток времени.

Таким образом такие приборы должны интегрировать своевременно проходящие через них количества, согласно соображениям, изложенным в § 16.

Эти приборы измеряют либо вес, либо объем. Для производственных целей не всегда безразлично, какая из обеих величин указывается. Желательно, однако, чтобы измерительное устройство измеряло либо вес либо объем, чтобы показания были таким образом независимы от удельного веса. Измерители потока требуют, однако, квадратичной зависимости \sqrt{V} . Изготавливаются такие приборы, автоматически дающие произведение объема на удельный вес.

Счетчики находят область применения преимущественно при контроле производства, т. е. для контроля текущих производственных процессов. В современных котельных установках применяются угле- и водомеры, а также паромеры. В современных машинных залах применяются паромеры, газомеры или нефтеммеры, в то время, как развиваемая мощность двигателей также непрерывно измеряется работомерами (§ 117), в данном случае счетчиком ватт-часов (описание которых в настоящей книге нами не приводится).

Такой измеритель (интегрирующий) удобен также и для менее продолжительных испытаний, так как обладает большой надежностью в отношении умышленных или неумышленных искажений результатов измерения. Измерители помещаются в прочный футляр и во многих случаях правильное их действие связано с тем, чтобы футляр оставался закрытым. При этом равномерный ход показаний счетчика является удобным средством контроля, который можно осуществить в любое время, взяв разность показаний измерителя. Трудности при непродолжительных испытаниях возникают лишь при отсчитывании счетчиков, которые не годны для этой цели. Как известно, на счетчиках водомеров, изготовленных для нужд городских водопроводов, отсчет производится раз в месяц или даже реже; здесь, конечно, отдельные литры никакого значения не имеют, но надо позаботиться о показаниях в миллионы литров, чтобы результат измерения не оказался фантастическим из-за того, что водомер один или несколько раз прошел через свое предельное показание.

При коротких испытаниях отсчет последней цифры на таких водомерах недостаточно точен. Вследствие этого, при пользовании водомерами или газовыми часами для непродолжительных испытаний, их снабжают специальным счетным механизмом, который дает достаточную точность измерения при очень непродолжительных промежутках между отсчетами. При контроле производства очень важным моментом является предотвращение возможности умышленных

искажений результатов измерения. С этой целью водомеры и газовые часы всегда запломбируются, а автоматические весы снабжаются специальным механизмом, гарантирующим невозможность искажения показаний. В отношении же *конструктивных оформлений*, большинство измерителей является *моторными счетчиками*, если пользоваться терминологией, употребляемой в электротехнике. Они представляют собою небольшие двигатели, число оборотов которых возрастает с количеством проходящего вещества. Двигатели могут быть поршневыми, как поршневые водомеры или сухие газомеры. Другие измерители являются моторами турбинного типа (лопаточными моторами), в них число оборотов струйного колеса зависит от попадающего на него количества или от скорости выхода вещества из сопла. К последним (турбинного типа) относятся крыльчатые водомеры одно и много-струйные, а также водомер Вольтмана. Эти же типы крыльчатых измерителей применяются в последнее время и для измерения воздуха; вообще, все чаще и чаще тип счетчика, подходящий для одного агрегатного состояния применим также и для других агрегатных состояний.

Другим хорошо распространенным типом моторного счетчика являются своеобразные капсюльные механизмы. Капсюль такого ротационного насоса является измерительной камерой, вращающееся же колесо — движущейся и потому измеряющей частью прибора. К этим измерителям относятся дисковые водомеры и капсюльные измерители воздуха, а также обыкновенные мокрые газовые часы с барабаном Кросслея. Моторные счетчики характеризуются тем, что во время работы они непрерывно движутся; таким образом, они равномерно забирают и отдают измеряемое вещество. Типы измерителей, которые мы назовем опрокидывающимися измерителями, не движутся непрерывно, но в них поочередно камера то наполняется, то разгружается опрокидыванием. Такие измерители применяются для измерения жидкостей и сыпучих тел, в первом случае как открытые водомеры, потому что они не работают под давлением, как моторные измерители, а потому не должны быть закрыты в футляре, а во втором случае, как основанные на принципе опрокидывания, весы для взвешивания угля и хлебных продуктов. Разновидность периодического измерителя жидкостей работает с помощью сифона (рис. 154).

К третьей более значительной категории приборов для измерения принадлежат измерители потоков. Последние используют перепад давления (жидкостей, газо- и парообразных веществ) среды для измерения протекающих в данный момент количеств и для их интегрирования каким-нибудь способом. Этот принцип перепада давления является пока единственным применимым при конструировании парометров. Слабые стороны его заключаются в том, что без дополнительных устройств он не дает суммарного значения количества вещества, протекшего за любой промежуток времени, так как он учитывает лишь количество вещества, проходящее в момент измерения. Поэтому при пользовании парометром прибегают к планиметрированию от руки начерченной диаграммы или пристраивают счетный механизм (рис. 50—51). С этой же целью труба Вентури снабжается малым, включаемым параллельно, парциальным счетчиком-водомером обычной конструкции, что является удобным средством интегрирования.

Ряд измерительных устройств, оправдавших себя на производстве, находится вне рассмотренной здесь схемы. Мы остановимся еще несколько на автоматических весах.

На работу всех измерителей затрачивается определенная энергия, что обуславливает потерю энергии потока, проходящего через измеритель. В моторных счетчиках потеря давления возрастает вообще пропорционально квадрату проходящего количества, поэтому сначала незначительна и только впоследствии достигает значительных величин. Опрокидывающиеся счетчики работают с потерей давления, величина которой не зависит от проходящего количества. В измерителях потоков и приборах других типов потеря давления используется непосредственно для измерения. В парометрах, а именно в одном из его типов с отверстием, потеря давления возрастает с квадратом количества, тогда как в поплавковых парометрах эта потеря остается постоянной. При выборе типа измерительного прибора вызываемая ею потеря давления может иметь большое

значение. Из-за потери энергии в частности рекомендуется пользоваться моторными счетчиками не слишком малых размеров, а опрокидывающимися измерителями — не слишком крупных размеров.

Наряду с потерей давления для многих целей измерения важно также поведение измерителя при малых протекающих количествах. Не везде, но например, в котельной установке очень легко устроить так, чтобы расход¹ воды, проходящей через измеритель, никогда не был меньше того, при котором измеритель может еще измерять вполне надежно. Используя для этой цели автоматические регуляторы, достигают того, что питание водой производится постоянно равным в секунду количеством подводящейся воды и только в зависимости от надобности прерывается на более или менее короткое время.

Ряд типов счетчиков имеет ту характерную особенность, что они правильно измеряют расходы протекающей воды в пределах от некоторого нормального значения до значения, являющегося определенной, незначительной процентной

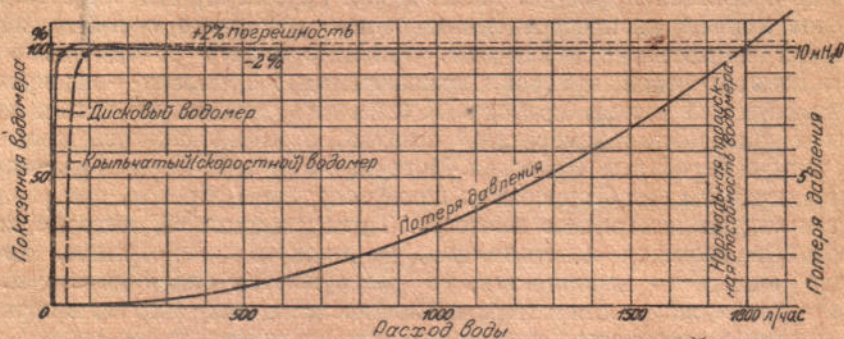


Рис. 191. Потеря давления и кривая погрешности водомера для номинальной производительности в 1800 л в час.

частью первого. Наименьший расход, при котором крыльчатые водомеры той же конструкции начинают давать правильные показания, примерно, 2% номинальной производительности, дисковые же водомеры — при 1%. Ниже этого минимального расхода пропорциональность между скоростью счетного механизма и проходящим количеством прекращается и счетный механизм работает значительно медленнее, чем должен был бы. Если проходящее количество продолжает уменьшаться, то счетчик вовсе останавливается. Тот предельный расход, при котором измеритель начинает давать показания, называется его чувствительностью. На рис. 191 дана характеристическая кривая погрешностей показаний водомеров. Если на ней указана номинальная производительность при потере давления в 10 м водяного столба, то это никоим образом нельзя отождествлять с целесообразной постоянной производительностью.

Номинальная производительность имеет лишь чисто техническое назначение: путем отнесения к определенной потере давления получить возможность однообразного определения (характеристики) водомеров, различных конструкций. Максимальная производительность измерителя указывает предел, выше которого измеритель нельзя нагружать даже для кратковременных измерений, без риска поломки, например, от действия центробежной силы; надо опасаться также незначительного, но быстрого срабатывания (износа) вращающихся поверхностей; от быстрого хода механизма порою страдает также и точность измерения. Постоянная производительность лежит значительно ниже максимальной (впрочем, также обычно, ниже, чем номинальная мощность, отнесенная к наибольшей потере давления — в 10 м водяного столба) и определяется с таким расчетом, чтобы износ прибора происходил не слишком быстро и смена измерителя требовалась только после продолжительной его службы. Лишь в редких случаях постоянная производительность составляет более $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$

¹ Количество воды, проходящее через поперечное сечение трубопровода за единицу времени.

максимальной. Поэтому, при выборе размеров измерителя необходимо учитывать как постоянную, так и максимальную мощность, из которых первая не надолго, а вторая вовсе не должна быть превзойдена; с другой стороны, необходимо иметь в виду также возможность забора воды, неучитываемой измерителем: если расход снижается ниже предела правильного показания, то или происходит недоучет или проходящие количества совсем не измеряются, хотя при длительном таком состоянии, например, при неплотном закрытии вентиля через измеритель могут пройти очень значительные количества. В зависимости от конструкции прибора возникают неправильности в том или ином смысле, если отношение наименьшего расхода (возможно и произвольного) к максимальному (возможно очень кратковременному) расходу превышает 1 : 20 или 1 : 50. В таких случаях необходимо попытаться помочь делу измерения способами эксплуатационного характера.

Другие типы расходомеров дают требуемую точность измерения даже при самых малых протекающих количествах. К последним относятся опрокидывающиеся водомеры и главным образом мокрые газовые часы, в которых гидравлический затвор препятствует какому бы то ни было прохождению газа без соответствующего поворота барабана. В том случае, когда водомеры служат для постоянной работы при питании котлов, их следует устанавливать в таком месте, где вода холодная, т. е. до подогревателя. Однако, специальные типы водомеров для питания котлов могут работать при температуре порядка 150°. При инжекторном питании расходомер следует установить в водопитательную линию, если он не должен еще измерять воду, теряемую инжектором. Кроме того, измерители, установленные до или после инжектора, дают различные показания на величину расхода пара инжектором; по сравнению с паровым питательным насосом без подогрева водомер лучше установить до инжектора, потому, что хотя израсходованное инжектором количество пара должно быть вновь испарено, но подводить тепло для испарения не нужно. В каждом отдельном случае установку необходимо произвести в зависимости от цели измерения. Открытые водомеры, часто применяемые для питания котлов, должны быть установлены на всасывающей линии, причем целесообразно устроить выравнивающий резервуар между водомером и питающим насосом. Закрытые водомеры, если питание производится не инжекторами, устанавливаются на нагнетательной линии перед подогревателем, если таковой имеется. Для питания котла предпочтение отдают преимущественно поршневым водомерам перед крыльчатками. При испытаниях нельзя обойтись без надлежащей проверки измерителя, так как все они обладают посредственной точностью, по крайней мере после длительной работы. В случаях, когда требуется точность измерения, необходимо при испытании заставлять работать счетчик только с определенной скоростью и дополнительно проверять его показания при этой скорости, одновременно проверяя проходящее количество иным способом. Необходимо, чтобы во время проверки температура жидкостей, а у газов давление, оставались такими же, как и при начальном испытании.

§ 82. Поршневые расходомеры. Поршневые водомеры широко применяются при питании котлов. Такой водомер фирмы Шмидт показан на рис. 192. Вода может поступать сверху и снизу каждого из поршней. При этом поступление и сток воды для каждого поршня регулируется другим поршнем. Направление же водного потока можно обозначить помощью стрелок, если учесть, что каждый поршень имеет в верхней части два параллельных, а в нижней части — два перекрещивающихся канала. Эти каналы и производят распределение воды, причем канал *a* ведет в пространство *A*, над поршнем *1*, *b* — ведет в пространство *B* под поршнем *1* и соответственно канал *c* ведет в пространство *C* над поршнем *II* и *d* — в *D* под поршнем *II*. Следовательно, стенка *ху* не вертикальна, как это кажется на одном из разрезов, а наклонная, как это можно видеть на разрезе наверху слева. Таким образом этот водомер представляет собой сдвоенный водяной двигатель и число его оборотов служит мерилем проходящего количества воды. Это количество отсчитывается по счетчику. В поршневом водомере фирмы Эккарта имеется только один поршень двойного действия, который в конце хода приводит в движение распределитель-

ный механизм и переключает четырехходовый кран Поршневый шток снабжен прорезью, скользящей по валу счетного механизма, и снаружи с обеих сторон шток снабжен зубцами. При помощи двух передач и промежуточного включения храповой передачи с правым и левым ходом, движения штока передаются счетному механизму таким образом, что последний всегда движется вперед как при ходе поршня вверх, так и вниз. Таким образом измеряется не число ходов, а полный путь, пройденный поршнем. По сравнению с суммированием ходов это является уточнением измерения, так как длина хода поршня при меняющейся скорости также колеблется; кроме того ход поршня может измениться вследствие изнашивания частей распределительного механизма. При этом, однако, возникает опасность, что обратно протекающие количества будут замерены, как положительные; обратные течения через неплотный питательный клапан или

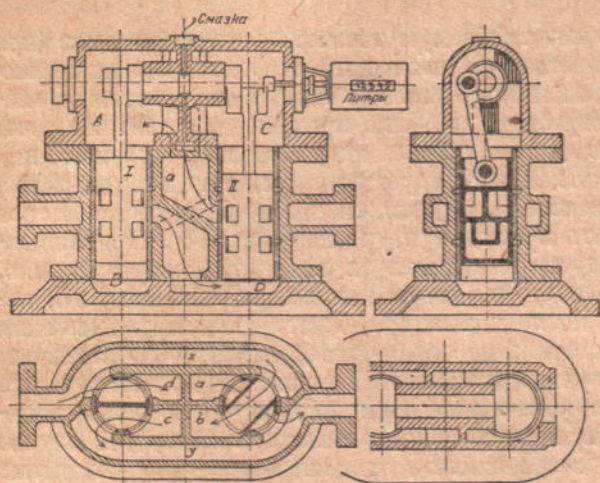


Рис. 192. Поршневой водомер Шмидта для питательной воды фирмы «Кеглер».

колебания столба жидкости между воздушными камерами или колебания в трубопроводе приводят к значительным преувеличениям показаний. По этим соображениям мы полагаем, что эта опасность значительно превышает преимущества, которые дает измерение длины хода взамен исчисления количества ходов, помимо определенного усложнения конструкции водомера. Идеалом, конечно, является счет ходов, при котором длина хода определяется легко в каждом случае. Перемена направления движения поршня осуществляется посредством выступа *W* на зубчатом колесе *N*, движущемся взад и вперед вместе

с зубчатым штоком поршня; этот выступ поднимает имеющийся для перемены хода груз до верхнего его положения, после чего последний перекидывается и посредством выступа *g* захватывает переводной рычаг *F* вместе с четырехходовым краном. При этом обе стороны поршня поочередно соединяются посредством каналов *B* и *D* с впуском и выпуском воды согласно стрелок 1 и 2. Резиновые буфера подхватывают с каждой стороны груз, переменяющий ход; сидящий снаружи на оси крана вспомогательный рычаг дает возможность прервать ход раньше времени, вследствие чего устраняется возможность возникновения погрешностей при измерениях; этим самым одновременно испытывают проходимость крана. Этот водомер довольно объемист, так как поршень должен делать не более 5 двойных оборотов в минуту. Но поэтому же водомер весьма прочен и не чувствителен к загрязненности воды. Можно сказать, что из всех, работающих под давлением, водомеров для питания котлов, водомер Экарта является наиболее надежным. Необходимо следить за тем, чтобы при работе он не превышал известной скорости. Иначе наступает следующее своеобразное явление: в результате повышения перепада давления трение четырехходового крана увеличивается настолько, что распределительный рычаг не в состоянии его более поворачивать и кран остается неподвижным в своем среднем положении. В этом положении с каждой стороны оставляется свободной по узкой щели для входа и выхода воды, через которые вода тогда постоянно протекает, не подвергаясь измерению. Появляющаяся в кране потеря давления создает при этом настолько большую одностороннюю нагрузку на пробку крана, что не помогает вспомогательный рычаг, предназначенный для поворота крана; необходимо тогда прекратить питание котла и пустить в действие вспомогательный рычаг. Для устранения этого мешающего явления следует при выборе конструкции водомера

считаться не со средней подачей воды в котельную установку, а с помощью питательного насоса. Последнему даже при питании по принципу непрерывности, например, посредством нового регулятора Ганнемана приходится иногда работать полной мощностью, например, когда регулятор испортился, а питание котла производить необходимо. Где группа котлов обслуживается через общую питательную линию питательным насосом относительно более крупных размеров, там, конечно, можно не соблюдать этого правила в отношении водомера, установленного в подводящей трубке отдельного котла. Улучшение установки получается при монтаже перед отдельным водомером соответственно подобранной дроссельной шайбы, которая при избытке давления в питательной линии по сравнению с давлением в котле, пропускает только те количества воды, которые водомер может пропустить и которые являются достаточными на случай опасности.

В американском водомере Вортингтона совершенно отсутствует кривошипный механизм и попеременно поступательное движение поршней осуществляется специальным золотниковым распределителем точно так же, как это имеет место в известных паровых дуплекс-насосах. Совершенно аналогичные измерители пригодны также для измерения сжатого воздуха.

§ 83. Скоростные водомеры¹. Небольшие типы крыльчатых водомеров применяются в качестве домовых водомеров при диаметре соединительных труб от 10 мм и выше. На рис. 194 показан образец крыльчатого водомера фирмы «Сименс и Гальске». Вода проходит через сито, входит через тангенциальные косо просверленные отверстия *a* в основную камеру *B*, приводит в движение вертушку *b* и выходит из *c*. Вертушка приводит в движение счетный механизм, отградуированный чисто эмпирическим путем на кубические метры. Если закрыть отверстие *c* и вместо этого просверлить отверстия в основной камере, выше середины, соответствующие отверстиям *a*, но в обратном тангенциальном направлении, то водомер одинаково реагирует на действие воды, протекающей в обоих направлениях. Если когда-либо вода течет в нем в обратном направлении, как это бывает при толчках насоса, то эта вода дает движение измерительному колесу в обратном направлении и количества, протекающие в обратном направлении, просто вычитаются из количеств, идущих в прямом направлении. В других типах крыльчатых водомеров вода попадает на крыльчатку не через венец из мелких сопел, но через одно большое сопло (водомер с нераздельной струей, рис. 195). Преимущество этих водомеров заключается в их меньшей чувствительности к загрязнению. Однако, при наличии сетки они имеют и недостаток, заключающийся в том, что засорение сетки имеет более сильное влияние на крыльчатку; вследствие одностороннего притока воды, крыльчатка, а также вал быстрее изнашиваются. Каждый крыльчатый водомер должен иметь механизм для регулирования. Для этой цели у водомера, изображенного на рис. 194, служат крылья *d*, которые могут поворачиваться

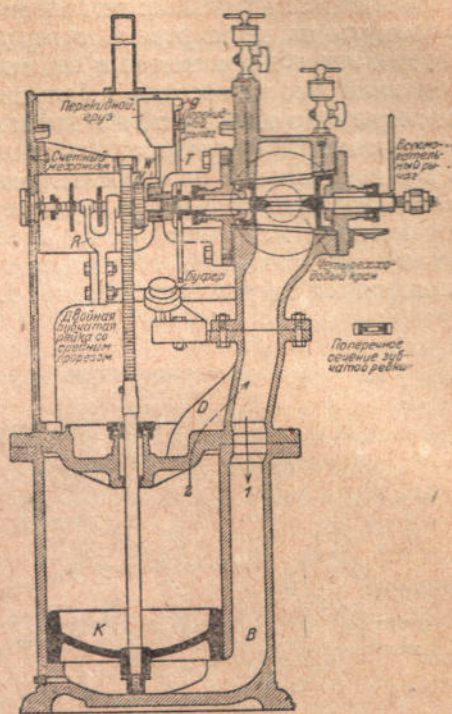


Рис. 193. Поршневой водомер для питательной воды Кеннеди фирмы «Эккардт»

¹ Скоростным водомером называются водомеры, в которых вода, проходящая под напором, производит вращение колес с крыльями или лопатками. Число оборотов передается счетному механизму и показывается циферблатом.

посредством ключа вокруг горизонтальной оси. Это приводит к образованию вихрей в различной мере в верхней части водомера и влияет на пропорциональность показаний. Другим, иногда применяемым в водомерах с неразделенной струей, средством является изменение наклона сопл по отношению вертушки с применением небольших вставленных букс. Этого результата нельзя, конечно, достигнуть ни расширением отверстий c , ни изменением счетного механизма, так как эти оба изменения в одинаковой сильной мере повлияли бы на запись показаний как малых, так и больших количеств протекающей воды. Благодаря таким регулирующим устройствам можно достигнуть того, что хорошие крыльчатые водомеры будут давать правильные показания расхода воды с точностью до 2% номинальной производительности. На рис. 191 даны характеристические кривые погрешностей и потеря давления для крыльчатых измерителей. Изображенные на рис. 194, 195 измерители являются водомерами-сухоходами, т. е.

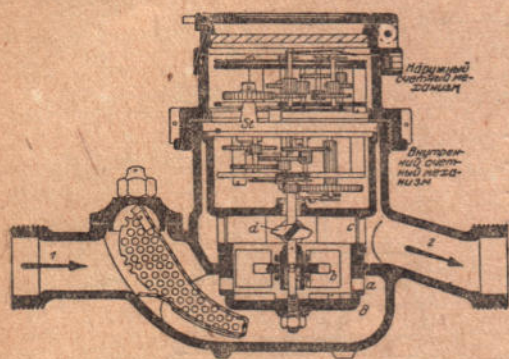


Рис. 194. Крыльчатый водомер-сухоход фирмы «Сименс и Гальске».

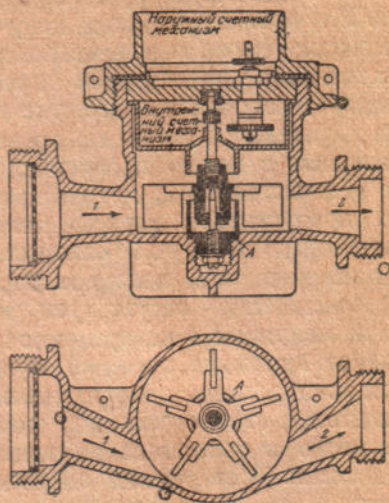


Рис. 195. Одноструйный водомер — сухоход фирмы «Мейнке».

в них смачивается водой только один внутренний механизм (передаточный механизм); одна из передач проходит от него через сальник St к наружному счетному механизму, дающему возможность отсчитывать показания посредством стрелки или цифр; передача наружного счетчика является сухой и движется в воздухе. В мокроходах все передачи, а также и счетные механизмы находятся в воде. Отсутствие сальника в мокроходах создает более легкий ход, а отсюда и более высокую чувствительность водомера при измерении незначительных количеств; однако, мокроходы применяются только в немногих случаях, потому что стеклянные его части загрязняются, либо покрываются коркой и отсчет показаний становится довольно затруднительным. Однако, таким водомерам необходимо отдавать предпочтение для лабораторных целей. В целях снижения погрешности при малых показаниях для небольших расходов воды устраивается соединение водомеров таким образом: малый и большой водомер включаются параллельно, так что все проходящее количество воды определяется суммированием отсчетов обоих водомеров. Малый водомер служит для пропуска воды при малом расходе ее, большой водомер в это время закрыт переключательным вентиляем. При повышении расхода воды разность давлений возрастает по обе стороны измерителя; когда разность давлений превышает определенную величину, переключательный вентиль автоматически открывается и включает в работу большой водомер, который тогда нагружается до пределов более точных показаний. Если расход воды опять снижается, то уменьшение потери давления приводит в действие переключательный вентиль, большой водомер выключается и вводится в работу малый водомер. Крыльчатые водомеры изготовлялись весьма крупных размеров. В последнее время для больших диаметров трубопровода предпочтение отдают водомеру *Вольтмана*, в качестве главного водомера.

Последний состоит из вертушки Вольмана (§ 44), которая устанавливается в трубопроводе таким образом, что занимает в сущности почти все поперечное сечение. Обороты вертушки регистрируются счетчиком. В водомере Вольмана, изображенном на рис. 196, вертушка вставлена в особую боксу, которую можно

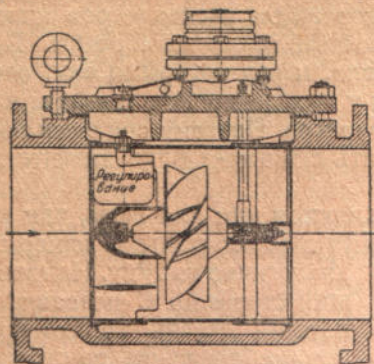


Рис. 196. Измеритель Вольмана со сменной вертушкой для грязной воды фирмы «Сименс и Гальске».

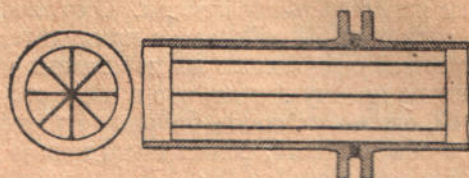


Рис. 197. Регулятор струи из жести.

нии от корпуса водомера, чтобы на них не действовал холод (Бопп и Рейер). Сальник вставлен так, что рассол может просачиваться через неплотности только каплями, не попадая в счетный механизм. Водомер Вольмана пропускает загрязнения в виде кусков, его подшипники защищены футляром от ила, но все же по отношению к последнему водомер все-таки чувствителен. Вертушка изготовляется часто из целлулоида и, благодаря потере веса в воде, почти не производит давления на подшипники. Зачастую ее изготовляют из никеля или специального сплава, пригодного для данного сорта воды, или для горячей воды (свыше 40° С). Кривая погрешностей и кривая потери давления для водомера Вольмана по характеру схожи с примером, приведенным на рис. 191. Водомер Вольмана дает очень неправильные показания, если перед вертушкой в воде имеются вихри. При этом следует заметить, что речь идет не о турбулентности в механическом смысле, но о простой вращательной составляющей в общем движении воды, которая направлена по винтовой линии так, что изменяется угол водных струек относительно лопаток. Поэтому, перед водомером устанавливается струевыпрямитель (рис. 197).

Последний представляет собой кусок трубы, разделенный звездообразно по своему поперечному сечению и имеющий в длину по направлению потока около 2 диаметров трубы и разделяет поток жидкости на отдельные потоки. Перегородки, образующие звезду, изготовленные из жести или литые, должны плавно заканчиваться в конце, с которого сбегает вода; в противном случае следует оставить достаточно длинный прямой участок трубопровода перед водомером. Водомер Вольмана в противоположность большинству других водомеров можно устанавливать также и в вертикальном трубопроводе.

§ 84. Капсюльные расходомеры. Как для жидкостей, так и для сжатого воздуха применяются измерители количества, которые по принципу своего дей-

заменить в случае необходимости без значительной помехи для работы. Это может быть удобным при измерении загрязненных вод. Для измерения количества рассола, протекающего в холодных установках, конструируют измерители Вольмана, в которых счетные механизмы находятся на достаточном расстоянии

от корпуса водомера, чтобы на них не действовал холод (Бопп и Рейер).

Сальник вставлен так, что рассол может просачиваться через неплотности только каплями, не попадая в счетный механизм. Водомер Вольмана пропускает загрязнения в виде кусков, его подшипники защищены футляром от ила, но все же по отношению к последнему водомер все-таки чувствителен. Вертушка изготовляется часто из целлулоида и, благодаря потере веса в воде, почти не производит давления на подшипники. Зачастую ее изготовляют из никеля или специального сплава, пригодного для данного сорта воды, или для горячей воды (свыше 40° С). Кривая погрешностей и кривая потери давления для водомера Вольмана по характеру схожи с примером, приведенным на рис. 191. Водомер Вольмана дает очень неправильные показания, если перед вертушкой в воде имеются вихри. При этом следует заметить, что речь идет не о турбулентности в механическом смысле, но о простой вращательной составляющей в общем движении воды, которая направлена по винтовой линии так, что изменяется угол водных струек относительно лопаток. Поэтому, перед водомером устанавливается струевыпрямитель (рис. 197).

Последний представляет собой кусок трубы, разделенный звездообразно по своему поперечному сечению и имеющий в длину по направлению потока около 2 диаметров трубы и разделяет поток жидкости на отдельные потоки. Перегородки, образующие звезду, изготовленные из жести или литые, должны плавно заканчиваться в конце, с которого сбегает вода; в противном случае следует оставить достаточно длинный прямой участок трубопровода перед водомером. Водомер Вольмана в противоположность большинству других водомеров можно устанавливать также и в вертикальном трубопроводе.

§ 84. Капсюльные расходомеры. Как для жидкостей, так и для сжатого воздуха применяются измерители количества, которые по принципу своего дей-

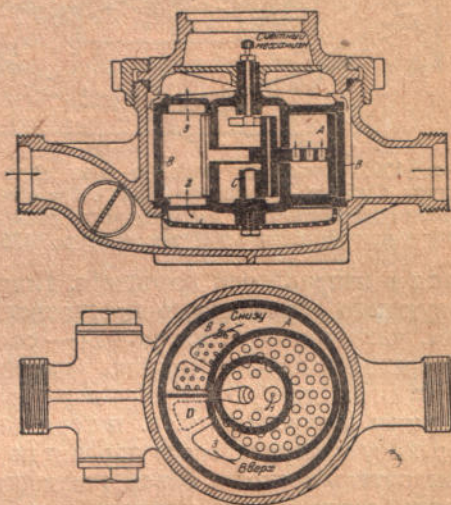


Рис. 198. Капсюльный измеритель для сжатого воздуха и воды фирмы «Бопп и Рейер».

Для сжатого воздуха измеритель иначе устанавливается в футляр: кулачковая муфта, штуцер для масла на входе, для манометра — на выходе.

ствия представляют обращенную капсюльную воздуходувку или капсюльный насос, т. е. являются капсюльными двигателями, которые приходят в движение под влиянием перепада давления, вызываемого ими в трубопроводе и при каждом обороте пропускают столько жидкости или газа, сколько соответствует емкости измерительной камеры. В отличие от скоростных расходомеров капсюльные расходомеры работают с принудительной подачей измеряемой среды. В этом отношении они похожи на поршневые измерители, перед которыми они, однако, имеют то преимущество, что в виду отсутствия у них движущихся взад и вперед частей, они могут давать большие количества оборотов. Поэтому они оказываются менее объемистыми, если только можно допустить сколько-нибудь значительную потерю давления.

Капсюльные расходомеры (рис. 198) применяются как для воды, так и для воздуха. Измерительный поршень *A* движется внутри измерительной камеры *BB*,

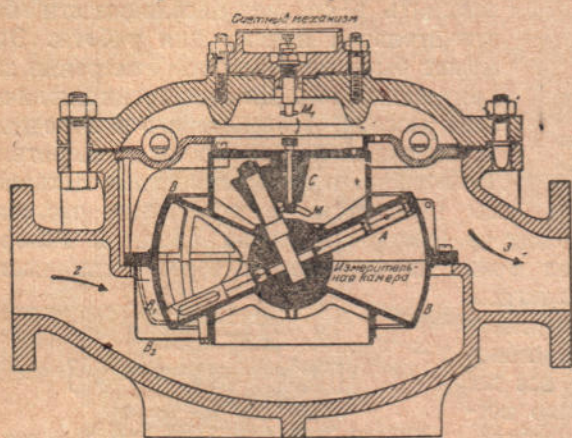


Рис. 199. Дисконный водомер для питания котла фирмы «Сименс и Гальске» для соединительного отверстия диаметром 80 мм и часового расхода в 15 м³ при максимальной температуре 150° С.

аналогично шатуну. Направляющий стержень *C* позволяет оси поршня делать только вращательное движение по стрелке *1*, перегородка же *D*, вставленная в стенки измерительной камеры и за которую захватывает прорез поршня, ведет поэтому одну из точек поршня прямолинейно. Вода, поступающая с левой стороны, входит снизу в одно из отделений (верхнее в плане) обоих серповидных пространств, которые образуются, с одной стороны, между стенкой камеры и поршнем, с другой стороны — между поршнем и внутренним кольцом камеры, и которые при движении поршня по направлению стрелки *1* также передвигаются в направлении вращения. Показанное в плане нижнее отделение соответствующего серповидного пространства, совершенно отделенного частично поршнем, частично перегородкой *D* — связано с выпускным отверстием посредством отверстия в верхней крышке измерительной камеры, лежащего от входного отверстия по другую сторону перегородки. Разность давлений во входном и выпускном отверстиях, т. е. потеря давления в измерителе, заставляет двигаться середину измерительного поршня по стрелке *1*. Во время каждого оборота через измеритель проходит объем жидкости, равный произведению площади (равной сумме серповидных площадей) на свободную высоту измерительной камеры. Следует еще отметить, что на каждой стороне перегородки *D* в лобовых стенках футляра водомера имеется по отверстию и карману. При этом на одной стороне, а именно у входа, отверстие расположено внизу, а карман вверху, на другой стороне — наоборот; карманы служат для выравнивания давления во внешнем и внутреннем серповидном пространствах. Средняя распорка поршня, изготовленного в виде двойной буквы *T*, имеет большое число просверленных отверстий. Эти отверстия необходимы для протекания воды, кроме того, поршень становится также и легче, влияние сил инерции становится меньше, а это при большом числе оборотов (до 700 оборотов в минуту у малых водомеров) не может не иметь значения. Аналогичным по принципу работы с этим водомером является дисконный водомер, который на протяжении последних лет завоевал себе положение, как домовый водомер на водопроводных сетях, наряду со скоростными, и который кроме того изготавливается специальной конструкции, как водомер для питания котлов. Один из типов такой конструкции показан на рис. 199.

Вместо колебательного движения в плоскости у дисконного водомера появляется качающееся движение измерительного диска *A* вокруг среднего шара. Движение диска происходит в измерительной камере *B*, боковые стенки которой

изготовлены в виде шарового пояса, а основания которой — в виде повернутых друг к другу конусов. Диск имеет возможность производить только (такое) качающееся движение, так как ось его отклоняется в сторону направляющим конусом С, поэтому в пространстве ось должна стоять наклонно и может выполнять только круговое движение вокруг центра шара. При этом диск соприкасается по некоторой линии, с одной стороны, с нижним, с другой стороны, — с верхним основанием корпуса водомера. Как и на рис. 198 перегородка D разделяет корпус водомера таким образом, что вода может попадать от входа по одну сторону перегородки, к выходу же по другую сторону перегородки только протекая вокруг шара. Вследствие соприкосновения измерительного диска с корпусом водомера качающееся движение измерительного диска принудительно связано с протеканием воды. Диск снабжен прорезью, перемещающейся вдоль перегородки и препятствующей вращению диска. Однако, конструкция прорези такова, что качающееся движение не прекращается. При каждом обороте диска содержимое измерительной камеры вытесняется — наполовину из верхней камеры, наполовину из нижней. Вход и выход воды происходит через треугольные отверстия в стенках измерительной камеры по обе стороны перегородки; посредством приделанных карманов В сообщение производится, с одной стороны, только с низом, с другой стороны, — только с верхом и, таким образом, один из входов служит для притока воды другой, же — для ее стока. Для водопроводов шар и диск обычно изготавливаются цельными из эбонита. Для водомеров питательной воды, работающих при более высоких температурах, шар, а также прочие трущиеся части изготавливаются из графитированного угля. При полной нагрузке число оборотов диска составляет — для малых водомеров до 700, для крупных водомеров (до 150 мм диаметра присоединительной трубы) до 450 оборотов в минуту. Указанный на рис. 199 диск изготовлен из бронзы. Изнашивание водомера в загрязненной воде, конечно, соответственно большее, поэтому применение дисковых водомеров для стационарной установки на питательных линиях рекомендуется только при пользовании очень чистой водой. Устройство обвода с запором помощью трех вентилях рекомендуется в целях надежности эксплуатации и чтобы иметь возможность достаточно часто осматривать водомер, однако, вследствие этого получается возможность умышленных или, из-за неисправности вентилях, неумышленных искажений результатов измерения. При более совершенной непроницаемости дисковые водомеры должны были бы точно отсчитывать также и незначительные количества. Однако, непроницаемость по линии соприкосновения с корпусом не бывает постоянно совершенной. Кроме того, для достижения легкого хода присоединение измерительного диска в дисковом водомере к перегородке устроено довольно своеобразно, как это видно из вышеприведенных рисунков. Совершенной плотности в нем вообще не бывает и незначительные количества могут проходить в нем без их измерения. Поэтому кривая погрешности дискового водомера имеет такой же характер, как кривая скоростных водомеров. Предел правильных показаний при малых расходах у дисковых водомеров лежит ниже, чем у скоростных (рис. 191); при более продолжительной работе с загрязненной водой дисковые водомеры имеют склонность останавливаться, скоростные же водомеры продолжают, однако вращаться, давая при этом неверные показания.

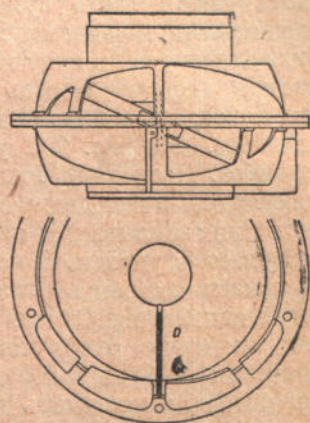


Рис. 200. Измерительная камера к водомеру указанному на рис. 199.

В пользу применения дисковых расходомеров для испытаний можно привести то соображение, что их показания, определяемые емкостью измерительной камеры, всегда неизменны и не зависят от рода измеряемой жидкости, в то время как у скоростных водомеров такая независимость показаний от рода измеряемой жидкости довольно не надежна. Для измерения иных жидкостей, кроме

В пользу применения дисковых расходомеров для испытаний можно привести то соображение, что их показания, определяемые емкостью измерительной камеры, всегда неизменны и не зависят от рода измеряемой жидкости, в то время как у скоростных водомеров такая независимость показаний от рода измеряемой жидкости довольно не надежна. Для измерения иных жидкостей, кроме

холодной и горячей воды, изготавливаются расходомеры специальных типов для промышленных надобностей («Сименс и Гальске»), в которых материал для конструкции подобран применительно к целям и условиям измерения. Эти расходомеры применяются преимущественно для жидкостей, но равным образом и для сжатого воздуха; в конструкциях дисковых приборов для воздуха применяются механизмы, изготовленные из чистого никеля. Эти измерители дают потери давления по величине такого же порядка, как и скоростные расходомеры, поэтому они не пригодны для измерения газа, дающего только несколько миллиметров водяного столба.

При загрязненной воде или газе капсюльные расходомеры создают затруднения при измерениях.

§ 85. Газомеры. Мокрые газомеры представляют собою своеобразную форму капсюльного расходомера с водяным затвором измерительной камеры. При измерении потребления газа в домах, они в последнее время вытесняются часто сухими газомерами — небольшими поршневыми машинами с поршнями, как у воздуховки. Сухие газомеры, в виду их большой точности, применяются в первую очередь для исследовательских целей тем более, что их можно получить соответствующих размеров. На рис. 201 указана схема такого мокрого газомера. Последний состоит из барабана с четырьмя камерами *A* до *D*, вращающегося в неподвижном корпусе. Нижняя часть барабана погружена в воду; последняя закрывает и открывает прорезы *a* и *d*, через которые газ, входя из *E*, поступает в указанные четыре камеры, а также отверстия *a'* до *d'*, через которые протекает измеренный газ к выходной трубе *F*. Камера *B* как раз наполнена, когда наполнение *C* только начинается; камера же *A* разгружается в то время, как закончена разгрузка камеры *D*. Ни при одном из положений барабана прорезы *a* и *a'* или *b* и *b'* и т. д. не бывают открыты одновременно так, чтобы газ мог свободно протекать через прорезы. Пока в измерителе находится достаточное количество воды, вращение барабана и производимый этим отсчет количества газа указывающим механизмом является обязательным условием для прохождения газа.

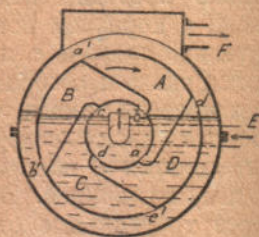


Рис. 201. Схема мокрого газомера.

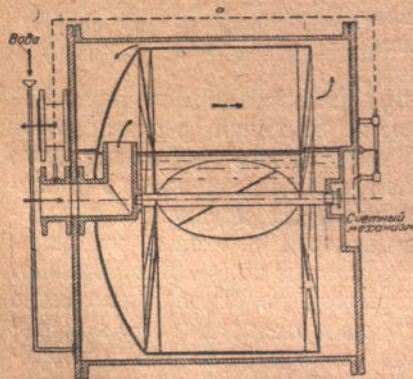


Рис. 202. Стационарный газомер с барабаном Кросслея.

По Кросслею прорезы устраиваются в обеих лобовых стенках и пространство барабана делают закрытыми. Газ поступает через одну из лобовых стенок и выходит через другую, таким образом, газ проходит через измеритель в осевом направлении. Прорезы для входа и выхода газа проходят почти радиально по лобовым стенкам барабана; при этом входная и выходная прорезы камеры *A* должны быть смещены относительно друг друга так же, как *a* относительно *a'* на рис. 201, т. е. почти на 180° .

На рис. 202 изображен в разрезе мокрый газомер; путь прохождения газа указан стрелками. Из перспективного рисунка можно видеть, как разделен барабан на камеры.

На рис. 203 отсутствуют футляр и выпуклая входная крышка. Камера А обслуживается прорезями a и a' . Разделение достигается четырьмя листами из жести, имеющими форму, указанную на рис. 204. Снаружи эти листы припаяны к цилиндрическому корпусу барабана, а внутри прикреплены к оси

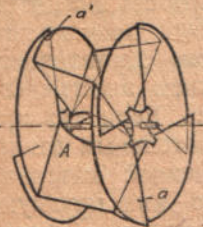


Рис. 203. Барабан Кросслея для газомера со снятым цилиндрическим чехлом.

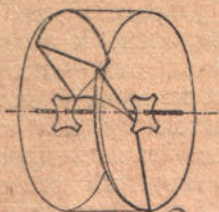


Рис. 204. Форма перегородки для газомера, указанного на рис. 203.

помощью маленьких звездообразных частей. Такой барабан Кросслея представляет собой сложную пространственную форму, действие которой совпадает со схемой, указанной на рис. 201. Он изготовлен из сравнительно тонкой белой жести, спаянной мягким припоем (Л.). Каждая камера всегда будет забирать одинаковый объем только тогда, когда уровень воды имеет одинаковую высоту. Однако, протекающий газ насыщается водяным паром и вода, таким образом, испаряется.

Для квартирных счетчиков для газового освещения применяются газомеры с «обратным измерением». В этих счетчиках влияние высоты уровня воды почти устраняется посредством более сложного разделения камер.

Если уровень воды слишком повышается, то опускающийся поплавок совершенно закрывает доступ газа. Эти устройства для нас интереса не представляют. Для испытания всегда применяются простые измерители, так называемые, опытные или стационарные измерители. Тогда следует обращать внимание на правильный уровень воды. Для этой цели маленькие газомеры для испытаний имеют одно отверстие для наполнения, другое — для стока воды; открывают оба отверстия, через одно наливают воду до тех пор, пока она не начнет переливаться из другого, тогда ей дают сбежать и заворачивают оба отверстия. В большом стационарном газомере, показанном на рис. 202 и 205, вода постоянно циркулирует и в А стекает через слив, так что уровень воды определяется высотой расположения слива; на таком уровне вода стоит в наполняющихся камерах. Вместе с тем слив при помощи крана H_1 соединен с впуском газа. Для обеспечения установки газомера в горизонтальном положении, газомеры для испытания снабжены уровнем. Стационарные газомеры имеют в разных местах футляра насечки или другие метки, которые устанавливаются по уровню.

Необходимо при каждом замере следить за давлением и температурой, причем решающее значение имеют температура и давление газа в наполняющейся камере в конце периода наполнения. Поэтому необходимо соединять водяной манометр (рис. 202) с впуском газа (труба a). Температуру же газа рекомендуется отмечать при выходе его, так как газ к концу периода наполнения, вследствие соприкосновения, приобрел уже температуру измерителя и воды; при измерении у входа газа температура может быть иной. Также желательно, чтобы газомер работал достаточно продолжительное время с используемым газом, чтобы вода насыщалась последним.

На рис. 205 указано часто применяемое устройство трубопровода на задней стороне газомера. На рисунке, помимо впускной и выпускной трубы, а также закрытого глухим фланцем запасного выпуска для включения с левой стороны, видна также воронка для притока воды и слив А Кинга. Краны H_1 и H_2 на все время работы должны быть открыты. Если был бы закрыт кран H_1 , то избыточное давление газа при впуске не могло бы оказывать воздействия на сливную

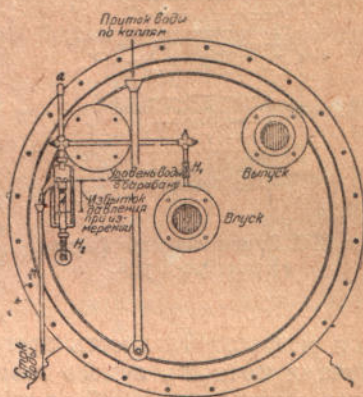


Рис. 205. Вид задней стороны газомера со сливом Кинга, фирмы «Эльстер».

трубку А и из по ледней вытекало бы, таким образом, слишком много воды, в газомере же ее оставалось бы слишком мало, в результате чего получалось бы преуменьшение показаний газомера. Высоту слива А можно изменять.

При пользовании газовыми часами для измерения расхода газа газомотором, прерывистый, происходящий толчками забор газа двигателем препятствует ходу газомера. Это явление можно устранить при помощи промежуточного резервуара, включенного между счетчиком и газомером, достаточного объема или — если газ находится под давлением — посредством эластичного мешка из прорезиненной материи. Если газ при всасывании находится под отрицательным давлением, то можно закрыть прорезиненной материей какой-нибудь круглый резервуар или плоскую коробку. Посредством пружинок можно предохранить материю от засасывания, вместе с тем она будет оставаться эластичной.

Сухой газомер (рис. 206) представляет собою прямоугольный ящик, который разделяется посредством горизонтальной перегородки на верхнюю камеру для управляющего и нижнюю для нагнетательных дисков; нижняя камера, в свою очередь, разделена посредством вертикальной стенки на две части, в которых перемещаются подвешенные к направляющему механизму нагнетательные диски, уплотненные кожей. Таким образом, газомер состоит из четырех камер, соответственно вдвоянной машине двойного действия; и, действительно, нагнетательные диски, работая посредством рычага и коленчатого вала на распределительный вал, приводят его в переменное возвратное, смещенное на угол в 90° , движение.

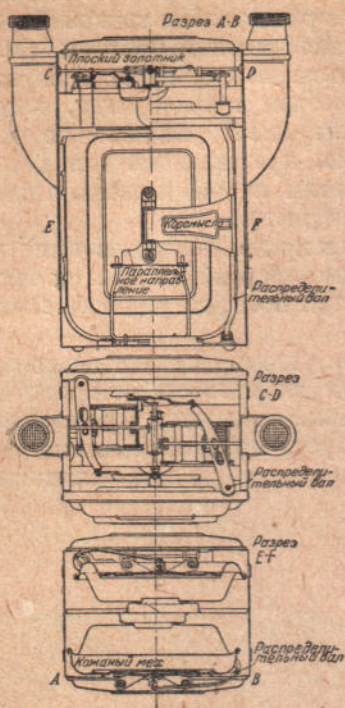


Рис. 206. Сухой газомер фирмы «Кромшре-дера».

Для управления служат указанные на рис. 206 золотники, движение которых производится от вала управления. Снижение или повышение номинального значения давления недопустимо, так как футляр газомера изготовлен из тонкой жести. Преимущество сухого газомера перед мокрым заключается в большем удобстве при переноске; для стационарных целей важным моментом является нечувствительность этого газомера к холоду. Для испытания во многих случаях точность сухого газомера вполне удовлетворительна. Сухие газомеры изготавливаются разнообразнейших форм (Л.) и в последнее время все больше и больше вытесняют мокрые газомеры, тем более, что путем целесообразной конструктивной проработки их производительность может быть значительно повышена (Л.).

В преис-курантах газомеров обозначением I (объем) указывается общая емкость измерительных камер, соответствующая одному обороту, обозначением V (расход), указывается наибольшее часовое протекающее количество газа. Частное $V : I$ указывает число оборотов в час главной оси. Число оборотов мокрых газомеров $V : I$ колеблется в пределах от 800 до 120, — для сухих газомеров от 120 до 150. Число оборотов ограничено для малого мокрого газомера в 120 в час, для большого — 80 в час, так как при большем числе оборотов поверхность воды становится беспокойной и щели открываются и закрываются недостаточно чисто, что узнается по шуму, напоминающему звук всасывания. При максимальном расходе газа потеря давления в мокром газомере составляет около 4 мм водяного столба, в сухом газомере — около 6 мм водяного столба. Для очень больших производительностей, вместо газомеров, которые в виду незначительного числа оборотов, становятся большими и дорогостоящими, пользуются в последнее время парциальными измерителями, описание которых будет помещено дальше.

В преис-курантах газомеров обозначением I (объем) указывается общая емкость измерительных камер, соответствующая одному обороту, обозначением V (расход), указывается наибольшее часовое протекающее количество газа. Частное $V : I$ указывает число оборотов в час главной оси. Число оборотов мокрых газомеров $V : I$ колеблется в пределах от 800 до 120, — для сухих газомеров от 120 до 150. Число оборотов ограничено для малого мокрого газомера в 120 в час, для большого — 80 в час, так как при большем числе оборотов поверхность воды становится беспокойной и щели открываются и закрываются недостаточно чисто, что узнается по шуму, напоминающему звук всасывания. При максимальном расходе газа потеря давления в мокром газомере составляет около 4 мм водяного столба, в сухом газомере — около 6 мм водяного столба. Для очень больших производительностей, вместо газомеров, которые в виду незначительного числа оборотов, становятся большими и дорогостоящими, пользуются в последнее время парциальными измерителями, описание которых будет помещено дальше.

В преис-курантах газомеров обозначением I (объем) указывается общая емкость измерительных камер, соответствующая одному обороту, обозначением V (расход), указывается наибольшее часовое протекающее количество газа. Частное $V : I$ указывает число оборотов в час главной оси. Число оборотов мокрых газомеров $V : I$ колеблется в пределах от 800 до 120, — для сухих газомеров от 120 до 150. Число оборотов ограничено для малого мокрого газомера в 120 в час, для большого — 80 в час, так как при большем числе оборотов поверхность воды становится беспокойной и щели открываются и закрываются недостаточно чисто, что узнается по шуму, напоминающему звук всасывания. При максимальном расходе газа потеря давления в мокром газомере составляет около 4 мм водяного столба, в сухом газомере — около 6 мм водяного столба. Для очень больших производительностей, вместо газомеров, которые в виду незначительного числа оборотов, становятся большими и дорогостоящими, пользуются в последнее время парциальными измерителями, описание которых будет помещено дальше.

При градуировке малых газометров, через последние пропускается воздух из газометра (рис. 155) или из калиброванного сосуда. Градуировку для газовых производств необходимо производить при избыточном давлении около 40 мм водяного столба. Обычно лучше производить поверку при условиях, существующих во время испытания, например, для всасывающего мотора при разрежении. Если воздушный колокол газометра слишком мал для испытания газометра, то колокол повторно наполняют воздухом, который посылается в газометр вслед за первым количеством. Газометры с колоколами, вместе с относящейся к ним арматурой, специально изготовленные для быстрой градуировки газометров, называются испытательными станциями. Эта аппаратура поставляется согласно прейс-куранта фирмами, изготовляющими газометры для нужд



Рис. 207. Потеря давления сухого газометра при различных расходах воздуха.

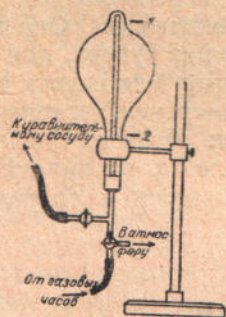


Рис. 208. Аппарат для определения емкости.

газовых заводов, для регулярной проверки домашних газометров (Л.).

В устройстве, указанном на рис. 208, стеклянная груша имеет известный объем между метками 1 и 2. Поднимая и опуская сосуд для поддержания уровня, соединенный с грушей резиновой шлангой и, управляя трехходовым краном, можно отсасывать из газометра один объем за другим и пропускать через газометр наружу. Большие газометры градуируются посредством малого нормального газометра; через оба газометра один за другим пропускается любое одинаковое количество воздуха, и тогда оба показания должны быть одинаковы. Проверка производится по секундному расходу воздуха, допускаемому для нормальных газометров и затем пользуются большим газометром до допускаемого эмпирически числа оборотов, как выше было упомянуто, до 80 ÷ 120 оборотов в час. Было бы лучше применить несколько параллельно включенных нормально малых газометров, общая производительность которых равняется максимальной производительности подвергающегося градуировке газометра. При градуировке все приборы и их водяное наполнение должны иметь одинаковую температуру, так как разность температуры в 3° соответствует погрешности в 1%. Поправки, посредством которых имеют в виду учесть неодинаковые температуры, вообще ненадежны.

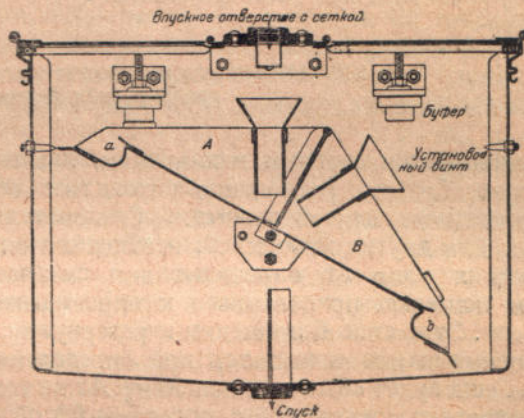


Рис. 209. Опрокидывающийся водомер фирмы «Экардта».

§ 86. Опрокидывающиеся расходомеры. Ранее описанные конструкции измерителей объемов жидкости должны быть монтированы стационарно в трубопроводе, полностью наполненном водой, которая вообще находится под давлением. Нижеследующие конструкции расходомеров не требуют такого рода монтажа. Напротив того, из таких расходомеров вода должна свободно входить и снизу свободно вытекать. В то время, как в закрытых водомерах корпус их необходим для замыкания прибора, в открытых водомерах корпус этот служит только для предохранения воды от разбрызгивания, а водомера от загрязнения. Корпус необходим также для предохранения горячей питательной воды от испарения и предотвращения, в некоторой степени, диффузии находящегося

в корпусе водяного пара и воздуха. Кроме того, корпус служит еще и для предохранения от растворения воздуха в воде. Это имеет значение при питании водой котлов, так как уменьшает коррозию питательных труб и котлов. Очень простые опрокидывающиеся водомеры удовлетворяют умеренным требованиям в отношении точности. Эти водомеры состоят из резервуара, разделенного на две части, из которых каждая попеременно наполняется, после чего наполненная каждый раз перевешивает и, перекидываясь, опорожняется, другая — в это время подставляется для наполнения. Опрокидывающиеся резервуары для малых водомеров изготавливаются из чугуна, для крупных водомеров — из стали. Изображенная на рис. 209 воронка для впуска предохраняет от разбрызгивания воды; вместе с тем точность измерений несколько повышается, так как опрокидывание происходит следующим образом. После наполнения половины *A*, вода через левый край сбегает в жолоб *a*, вследствие чего центр тяжести сразу перемещается, резервуар перекидывается и опорожняется. Число опрокидываний

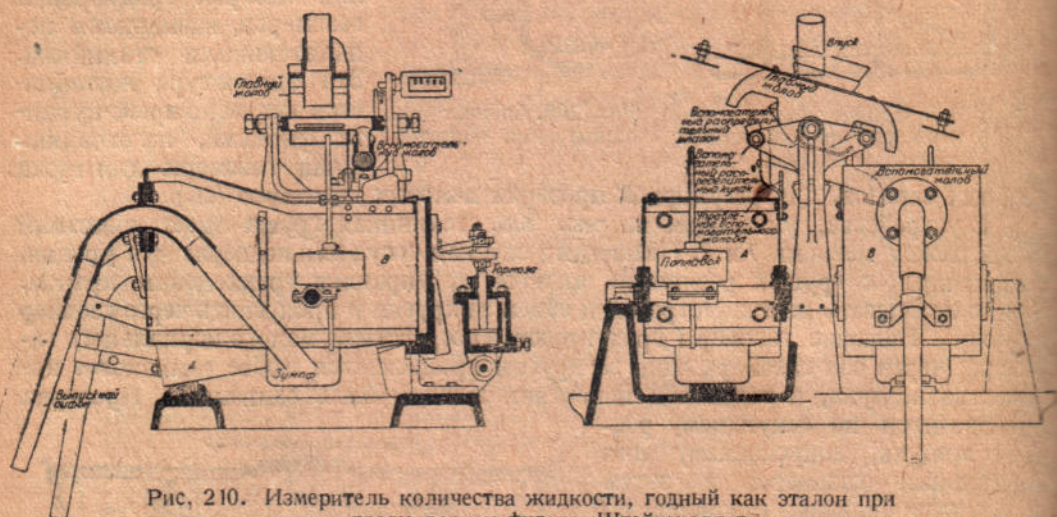


Рис. 210. Измеритель количества жидкости, годный как эталон при градуировках фирмы «Штейнмюллер».

отсчитывается счетным механизмом, дающим показания в кубических метрах. Таким образом, расходомер определяет объем, хотя опрокидывание вызывает перемещение центра тяжести. Следовательно, для определения веса горячей воды или других жидкостей, необходимо определить плотность. В других конструкциях удар от опрокидывания смягчается демпфированием, осуществляемым помощью приданного к опрокидываемому сосуду крыла, падающего в воду. Этот способ применим к резервуару, слив которого не находится на дне. Опрокидывание начинается при определенном наполнении жолоба *a*. Но тогда вода еще будет сбегать в половину *Aa* до тех пор, пока под впуском не пройдет перегородка, отделяющая половину *Bb*. С начала опрокидывания до этого момента прошел, однако, определенный промежуток времени; и прошедшее за это время количество воды будет больше, чем то, которое должно вызвать опрокидывание, на количество, прошедшее за время опрокидывания. Этот излишек зависит от силы притока воды. Наполнение водой производится непосредственно через ось вращения сосуда. Этим уменьшаются ошибки вследствие изменения уровня воды от удара. Ошибки могут также возникнуть от нарушения спокойного уровня воды притекающей водой. Однако, возникающая при этом погрешность большей частью уравнивается предыдущей. В водомере, указанном на рис. 210, эта зависимость от притока воды устранена. Наполнение водомера полным потоком воды совершается только приблизительно, в то время как точное выравнивание до опрокидывания производится слабым и при том всегда равномерным водным потоком.

Этот водомер состоит из двух, покоящихся на призмах, сосудов *A* и *B*, опрокидывающихся независимо друг от друга. Каждый из них опрокидывается,

как только жидкость в нем достигнет определенного веса; тогда он опорожняется через трубу, действующую сначала как простая сливная труба. Когда затем противовес возвращает сосуд в прежнее положение, то опораживание не смотря на это не прекращается, потому что труба действует как сифон до тех пор, пока воздух не войдет в его наружный конец и сразу прервет действие сифона. Посредством устройства водосборного ящика небольшой поверхности достигается то, что всегда остается определенное количество воды и что разности уровней поверхности оказывают незначительное влияние. Наполнение производится следующим образом: главный и вспомогательный желоба подают воду в тот или иной сосуд, в зависимости от их положения. Из главного желоба все время идет равномерный поток воды, через прорези в оси в вспомогательный желоб. При наполнении одного из измерительных сосудов поднимается поплавков, который в подходящий момент переключает главный желоб на наполнение другого сосуда, в то время как из вспомогательного желоба вода продолжает течь в первый сосуд. Первый сосуд тогда начинает медленно и равномерно наполняться, независимо от силы водного потока. Так как центр тяжести воды, содержащейся в сосуде, рассчитанный по противовесу, лежит по другую сторону призмы, то центр тяжести всей системы медленно приближается к острию призмы, пока не наступит опрокидывание в тот момент, когда центр тяжести перейдет через это острие. Во время падения сосуд перекидывает вспомогательный желоб на другой сосуд. Следует, однако позаботиться о том, чтобы вспомогательный желоб уже ранее не лежал на опрокидываемом сосуде, так как в противном случае изменяющееся трение в опорах желобов могло бы повлиять на продолжительность опрокидывания. Существенное значение в этой конструкции имеет то обстоятельство, что обе боковые стенки опрокидывающегося сосуда, идущие параллельно опорным призмам, до опрокидывания сосуда находятся в вертикальном положении. Особенность некоторых конструкций заключается в том, что стенка, лежащая в направлении опрокидывания, бывает наклонной. В виду того, что положение центра тяжести жидкости, содержащейся в сосуде, зависит от наполненного объема, то это наклонное положение стенки имело бы своим следствием то, что опрокидывание не происходило бы при определенном весе наполнения, но зависело бы от удельного веса наполняемой жидкости. Это устройство не дает возможности измерить и объем. Измеритель, указанный на рис. 210, считается среди открытых водомеров одним из наиболее точно работающий; точность его измерения определяется до $\frac{1}{10}\%$. При длительных периодах измерения (отсчеты утром и вечером в котельных установках), а также для измерения жидкостей с постоянным, почти одинаковым удельным весом (питательная вода — только малая зависимость удельного веса от температуры воды) ничего нельзя возразить против применения этого измерителя. При испытании необходимо учесть, что момент опрокидывания не означает наполнения сосуда определенным количеством воды, так как часть воды еще раньше была направлена через главный желоб в другой сосуд. Наблюдение за количеством воды посредством определения времени только немногих опрокидываний может при меняющемся притоке воды привести к погрешностям.

Барабанный водомер (изображенный на рис. 211), который обыкновенно помещается в круглом футляре, применяется для измерения количества конденсата в паровых отопительных установках низкого давления, для чего он включается в конденсатную линию. Механизм водомера помещен в футляр, имеющий форму барабана и по внешнему виду похож на газомер. Внутри на оси насажен круглый, цилиндрический барабан, внутренность которого разделена на три камеры. Вода подается по кольцевой трубке, идущей вокруг оси. В тот момент, когда вода течет в камеру А камера С опорожняется, а В бездействует.

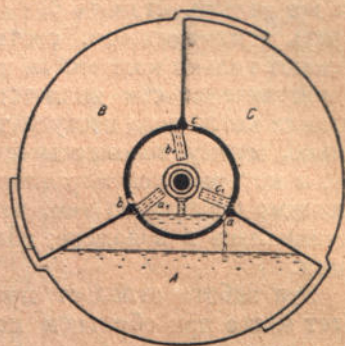


Рис. 211. Счетчик с барабаном, фирмы «Сименс и Гальске».

Барабанный водомер (изображенный на рис. 211), который обыкновенно помещается в круглом футляре, применяется для измерения количества конденсата в паровых отопительных установках низкого давления, для чего он включается в конденсатную линию. Механизм водомера помещен в футляр, имеющий форму барабана и по внешнему виду похож на газомер. Внутри на оси насажен круглый, цилиндрический барабан, внутренность которого разделена на три камеры. Вода подается по кольцевой трубке, идущей вокруг оси. В тот момент, когда вода течет в камеру А камера С опорожняется, а В бездействует.

Как только камера *A* наполнилась, вода скопляется в подводящей трубе до тех пор, пока не начинает течь через отверстие *b* в камеру *B*. Тогда левая сторона барабана получает перевес, барабан поворачивается на 120° , камера *B* наполняется и *A* в то же время опорожняется. Таким образом каждый поворот барабана соответствует емкости трех камер.

Ранее еще нами было указано на некоторые преимущества открытых водомеров по сравнению с закрытыми. Их ценное достоинство заключается в том, что они дают незначительную потерю напора, соответствующую только их строительной высоте, и эта потеря является постоянной при всех расходах; они не пропускают без замера даже самые незначительные количества воды. Незыблительность же показаний водомера при всех расходах зависит в существенном от качества работы. Тем не менее следует отметить, что открытые водомеры все же нельзя оставить без надзора, потому что сами по себе они не могут подавать изменяющиеся, соответственно потребности, количества воды, но пропускают только количества притекающей к ним воды; и это количество не всегда в действительности является расходуемым количеством. Если, например, при питании котла вода поступает в водомер из бака, и если даже, как это желательно, между водомером и питательным насосом установлен второй запасный бак, в который водомер опоражнивается и из которого насос засасывает, то необходимо следить за тем, чтобы вода не переливалась из второго бака или не застаивалась в водомере; оба эти момента могли бы исказить результаты измерения.

Эта забота отпадает при измерениях ограниченных количеств воды, как то имеет место при обратном подводе конденсата из машин или из отопительных установок.

Принцип опрокидывающихся водомеров (кроме жидкостей всех видов) применяется также и для сыпучих тел. Устройства, показанные на рис. 210 с одним или двумя сосудами, применяются для взвешивания угля и зерновых продуктов (Бопп и Рейтер). Применяются также механизмы, вращающиеся вокруг оси, сходные с изображением на рис. 211 (Полизиус).

§ 87. Специальное и автоматическое взвешивание. Изображенный на рис. 212 аппарат служит для взвешивания сыпучих тел при непрерывном их поступлении; измеритель, предохраняющий груз еще от потерь на раструску и от многократных пересыпаний, работает так: ленточный транспортер или цепь с ковшами (конвейер), передвигается горизонтально над платформой весов, установленной на пути движения. Рычаги платформы действуют на коромысловые весы, гири которых таким путем принимают положение, в зависимости от наличной нагрузки платформы транспортируемым грузом. Веса, указываемые положениями измеряющего груза, непрерывно суммируются; для этого цепь с ковшами приводит в движение вал, который посредством кулачного диска вызывает отклонения суммирующего рычага. При каждом отклонении рычаг продвигает вперед колесо счетного механизма. Движение суммирующего рычага, а также и зацепления прекращается, когда его упорная призма ударяется о коромысло весов; оно прекращается тем позже, чем больше находящийся в данный момент на рычаге платформы груз. В момент нагрузки коромысло устанавливается посредством поперечного вращающегося зажимного рычага, который приводится в действие зажимным колесом. Таким образом для взвешивания всегда необходимо уловить момент, когда ковш стоит на платформе симметрично и суммирующий рычаг находится наверху. Вес, соответствующий нулевой точке весов, установлен таким образом, чтобы включающий механизм при ненагруженных ковшах не имел возможности продвигаться вперед. С устройством, применяющим ленточный транспортер, можно достигать точности результатов взвешивания от 1 до 2%. Такая точность для производственных целей была бы вполне удовлетворительной хотя и не достаточной для градуировки такого устройства. Дальнейшей задачей является возможность такой регистрации любых грузов, неравномерно проходящих по пути взвешивания, чтобы участие человека при взвешивании было исключено, причем одновременно должны быть приняты меры против неправильных взвешиваний, чтобы посредством показаний весов получить точные данные для расчетов шихты и других целей.

Автоматические вагонные весы Шенка (Л.) работают следующим образом: на платформу весов подается груженная вагонетка с любым грузом в пределах между минимальной и максимальной нагрузкой весов. Специальный запорный болт препятствует прохождению вагонетки через платформу без взвешивания. В тот момент, когда вагонетка станет на платформу, последняя опускается и тем тотчас же приводит в движение второй болт на другой стороне платформы, который не даст возможности отвести назад вагонетку после того, как началось взвешивание. Вместе с тем, путем опускания груза вводится в действие взвешивающий механизм, помещенный в будке с боку от платформы. Сперва специальный упор должен пройти через прорезь, в которую он попадает только тогда, когда груз на платформе находится в пределах точных показаний; в таком случае арретирование коромысла прекращается и одновременно освобождается перемещающийся в вертикальном направлении приводной рычаг, связанный кинематически посредством зубчатой передачи с передвижным грузом коромысла.

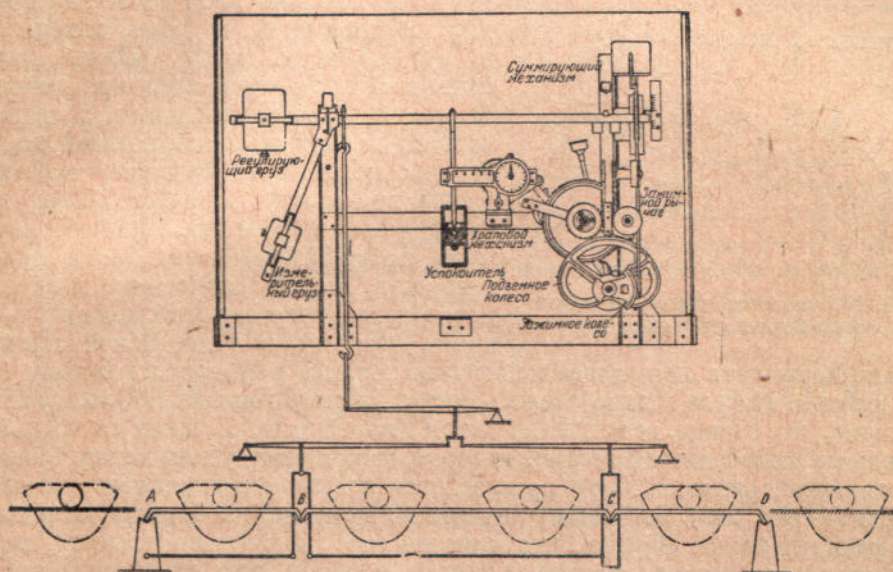


Рис. 212. Автоматические весы с транспортером.

Посредством надлежащего расположения зубчатых колес обеспечивается отсутствие момента вращения от зубцов в отношении коромысла. Приводной рычаг начинает опускаться и продвигает вперед по коромыслу передвижной груз, отчего приводится в движение счетный механизм весов. В тот момент, когда коромысло опускается вниз, в ведущий рычаг попадает храповик и задерживает его на месте, в то же время от давления, испытываемого храповиком, опускается упор сзади платформы весов, и вагонетка освобождается. Как только вагонетка сошла с платформы, последняя под влиянием противовеса подымается, оба запорных рычага меняют свое положение, ведущий рычаг приводится в свое наиболее высокое положение и весы готовы для следующего взвешивания. В виду того, что для приведения в действие взвешивающего механизма требуется определенный минимальный груз, то невозможно регистрировать людей, случайно проходящих по платформе, а также случайные грузы незначительной величины. Запорные болты препятствуют проходу на весы разгруженных вагонеток в обратном направлении. Для обратного хода последних должны быть проложены специальные рельсы. Иногда устраивают на рельсах специальный уступ, не допускающий обратного откатывания нагруженных вагонеток. В новейшей конструкции таких весов требование минимального груза для взвешивания отпадает. В этих весах регистрируются все поступающие грузы, начиная от нуля и до максимального допускаемого значения. Точно так же, как в весах с подвижным грузом, в них для этой цели передвигающий стержень сперва приводит в движение большой подвижный груз. Движение своевременно прекра-

щается и точное взвешивание заканчивается посредством второго меньшего груза. Перемещения обоих грузов передаются двум отдельным счетным механизмам и таким образом общий вес можно определить путем суммирования показаний обоих счетных механизмов. В весах других конструкций измерение производится не посредством опускающегося ведущего рычага, а посредством энергии маховика, который приводится в движение под влиянием опускающегося груза и тогда производится взвешивание.

Автоматические весы находят также применение при эксплуатации котельных установок; одновременно питание водой определяется водомерами и поступление угля — посредством автоматических весов. На основании обоих этих

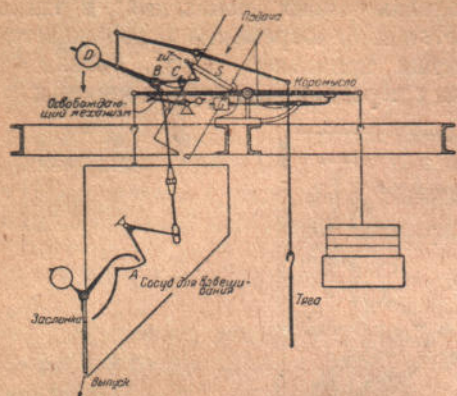


Рис. 213. Полуавтоматические угольные весы фирмы «Шенка».

показаний ежедневно определяется паропроизводительность, каковая при более или менее постоянных соотношениях, в смысле качества угля и температуры пара, является хорошим масштабом для сравнений. Запасы угля и воды, находящиеся в котельной к концу работы, должны быть подсчитаны и приняты во внимание. В современных котельных с цепными топками и механической подачей топлива из высоколежащего бункера необходимо учесть при окончании работ общее количество угля в бункерах. Бункера рассчитаны преимущественно на 24-часовую потребность, поэтому отнесенные к дневному потреблению погрешности становятся большими, так как в технической практике

трудно поддерживать одинаковое количество топлива в бункере к каждому окончанию работы. Иногда можно сделать расчет расхода топлива не ежедневно, но ежемесячно, что, однако, не всегда является достаточным. В таких случаях предпочтительнее пользоваться весами, которые взвешивают уголь между бункером и колосниковой решеткой. Это производится *полуавтоматическими весами* для угля Шенка (рис. 213). Эти весы установлены в спуске из бункера на колосниковую решетку таким образом, что взвешиваемое количество подается на них сверху наклонно и снизу проходит дальше. Опорой для коромысла весов и верхней части спуска служит соответствующим образом расположенная рама из прокатного железа. К коромыслу слева подвешен сосуд для взвешивания с заслонкой, а справа измеряющий груз, весом в 100, 200 или 300 кг, в зависимости от величины применяемых весов. Во время засыпки заслонка *S* открыта и сосуд для взвешивания наполняется. При достижении определенного веса, левое плечо коромысла опускается и разъединяет запор *C*. Груз *D* падает и закрывает доступ топливу при помощи заслонки *S*, поворачивающейся рычажным механизмом, вращающимся вокруг *B*. Одновременно груз открывает заслонку, служащую для закрывания сосуда для взвешивания. Взвешиваемое топливо проходит вниз, коромысло падает обратно направо, но рычажный механизм остается прочно в конечном положении, при котором выпуск закрыт, а выпуск открыт. Для производства нового взвешивания, совершающегося затем автоматически, необходимо потянуть за натяжной стержень, отчего поднимается груз *D* и закрывается замыкающая заслонка сосуда для взвешивания, а выпуск открывается; и, наконец, в *C* находится запор, который по окончании нагрузки автоматически вновь освобождается. Таким образом всякое взвешивание требует только перемещения натяжного стержня. Количество взвешиваний подсчитывается счетчиком. Эти полуавтоматические весы работают не с такой точностью, как автоматические вагонные весы. Однако, для производственных нужд точность этих весов признана удовлетворительной и по указанным выше соображениям они могут дать лучшие результаты при ежедневных подсчетах, чем автоматические весы. Полуавтоматические весы можно приспособить для различных сортов топлива, подгоняя размеры подводящих каналов. Однако, при перемене сорта топлива возможны случайные неполадки. При перемене топлива

необходимо подрегулировать положение вспомогательного подвижного груза для компенсации разницы в инерции, проявляющейся в период от опрокидывания коромысла до полного замыкания впуска. Для проверки веса с сосудом ставят под выпуском и производят одно или несколько опорожнений.

Наиболее простое измерение количества угля для производственных целей можно осуществить на цепных решетках при помощи суммирующего механизма, интегрирующего произведение из перемещения решетки на высоту насыпанного на ней угля.

§ 88. Указатели расхода имеют целью определить на основании некоторых признаков количество вещества, переносимое потоком. Эти приборы указывают секундное протекающее в данный момент количество, т. е. *расход* и только посредством интегрирования потока по времени можно определить количества, прошедшие через измеритель в известный промежуток времени, вследствие чего указатель расхода становится счетчиком (паромер и т. д. § 91). В этом смысле в качестве указателя расхода можно пользоваться, согласно § 78 и 79, дроссельными приборами в соединении с каким-нибудь микроманометром. Для избежания потери давления в трубопровод помещается также статическая трубка, аналогичная трубке Прандтля, которая также соединяется с измерителем давления. Если статическая трубка направлена при этом по оси трубы, в которой требуется измерить протекающее количество, то для определения протекающего объема V по поперечному сечению f со скоростью v , можно применить формулу непрерывности в виде $V = \alpha \cdot f \cdot v$, где α является отношением средней скорости к скорости в середине трубы; согласно рис. 163 α можно бы принять, примерно, равной $3,08 : 3,5 = 0,88$; однако, неизвестно, насколько эта величина приемлема для общего применения. Зависимости (22) и (23) § 78 действительны для всякого измерения мощности потоков. Количество вещества, проходящее через суженное поперечное сечение, площадью $f \text{ м}^2$, определяется выражением

$$V = k \cdot f \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta p / \gamma_1} \text{ м}^3/\text{сек} \quad (1)$$

или

$$G = k \cdot f \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta p \cdot \gamma_1} \text{ кг}/\text{сек}, \quad (2)$$

где $\gamma_1 \text{ кг}/\text{м}^3$ — удельный вес перед поперечным сечением дросселя,

$k = \alpha \epsilon$ — предполагаемый коэффициент истечения и

$\Delta p \text{ кг}/\text{м}^2$ — потеря давления.

Если γ_1 величина постоянная, то произведение $f \cdot \sqrt{\Delta p}$ является мерой проходящего количества.

Можно поэтому пропустить измеряемое количество через вставленное в трубопровод сопло с постоянным сечением f и вести наблюдение за измеряемым давлением $p_1 - p_2 = \Delta p$. Либо можно определять разность давлений $p_1 - p_2$ посредством постоянной или изменяющейся нагрузки какого-нибудь поплавка, могущего перемещаться по направлению потока против направляющей силы; при увеличивающейся поверхности f отверстия поплавков оттягивается тем дальше, чем больше скорость потока. Положение поплавка указывает проходящее количество (поплавковые измерители). Требуется вообще, чтобы отклонение было прямо пропорционально весу измеряемого пара; это условие, менее существенное для указывающих приборов, в самопишущих же приборах оно необходимо для планиметрирования вычерченных на бумаге диаграмм, так как иначе величина площади в различных точках будет различной. В автоматических счетных устройствах необходимым условием является пропорциональность между скоростью счетчика и проходящим в данный момент количеством пара, так как при измерениях посредством дроссельных устройств, вес пара пропорционален корню из разности давлений $p_1 - p_2$; необходимо, следовательно, применение манометра, показания которого пропорциональны корню (§ 32), почему и называют эти приборы измерителями количества. Если у газов или паров может изменяться удельный вес $\gamma_1 \text{ кг}/\text{м}^3$, то ни измерители с насадкой, ни поплавковые в сущности не измеряют точно ни веса, ни объема пара. Согласно ра-

венства (1) и (2) измеряется средняя геометрическая из обеих величин, т. е.

$$\sqrt{GV} = k \cdot f \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta p} = V \sqrt{\gamma_1} = \frac{G}{V \gamma_1}.$$

Для получения веса необходимо результат измерения помножить еще на $V \gamma_1 \cdot \gamma_1$ зависит от давления p_1 и от температуры пара t_1 ; при измерениях пара необходимо иметь в своем распоряжении таблицы, из которых заимствуют различные значения для высоты диаграммы в миллиметрах соответственно каждому значению p_1 и t_1 . Очень удобный метод для суммирования количества воды, проходящей через трубу Вентури, осуществляется при помощи небольшого добавочного водомера, включенного в соединительную трубу между входом и сужением (рис. 187). Так как потеря давления до сужения трубы Вентури пропорциональна квадрату протекающего количества воды, а с другой стороны количество воды, проходящее через обычный водомер, находится в такой же квадратичной зависимости от создаваемой измерителем потери давления (рис. 191), то будет существовать пропорциональность между общим проходящим через трубу Вентури количеством воды и дробной ее частью, проходящей через водомер. Таким образом показание последнего должно быть только помножено на постоянную, характеризующую присоединение водомера, или необходимо только соответственно изменить шкалу водомера, чтобы иметь возможность непосредственно отсчитывать общее проходящее количество. Польза парциального водомера заключается еще и в том, что потоки бывают настолько мощны, что нельзя пропустить все проходящее количество через суммирующий прибор. Эти потоки разделяются таким образом, что некоторая часть общего наличного потока проходит через соответственно меньший измеритель, показание которого, при несоответственном устройстве счетчика, должно быть умножено на некую константу. Исходя из этих соображений, в крупных газовых заводах применяются следующие устройства. Общее количество газа вытекает, например, через 50 одинаковых сопел, и таким образом общий поток газа разделен на 50 равных частей; из них 49 идут в общую камеру и далее через регулирующий орган в сеть, тогда как 50-ая часть проходит отдельно через газовые часы, ими замеряется и тогда снова соединяется с общим газовым потоком. При этом дифференциальный манометр указывает разность давлений между обоими пространствами за насадками, из которых в одно вливаются 49 насадок, в другое — одна. Вышеупомянутое дроссельное устройство время от времени устанавливается так, чтобы эта разность давлений равнялась нулю. Такое регулирование необходимо потому, что потеря давления в газомерах не пропорциональна квадрату протекающего количества; она делает показания установки не надежной, коль скоро обслуживающий персонал заинтересован в результатах измерения. Вместе с тем необходимо принять в расчет, что большая потеря давлений в соплах, в сравнении с незначительной потерей давления в газовых часах, требует продолжительного расхода на работу насоса. В противоположность большому газовым часам, делительный газомер (С. Эльстера) хотя и стоит дешевле, но вызывает увеличение эксплуатационных расходов, что оправдывает применение его только при измерении очень больших количеств. В основном, речь идет здесь о применении к газам системы Брауера (Л.) для большого водного потока. Другой попыткой обойти расход на приобретение большого главного газомера для больших газовых заводов является применение измерителя Томаса. Измеряемому количеству газа помощью электрически нагреваемого сопротивления сообщается определенное количество тепла и температура газа повышается. Термометром сопротивления измеряют повышение температуры от t_1 до t_2 и, если известно количество сообщенной энергии, то можно вычислить количество газа, если известен его состав, а, следовательно, и его теплоемкость. Измеритель Томаса снабжен также механизмом для непрерывного суммирования. В противоположность газовым часам, прибор Томаса показывает вес проходящего газа. Это измерение во многих случаях является желательным, потому что влияние давления сразу исключается и не нужно приводить к нормальному барометрическому давлению, как это имеет место в производственном контроле газовых заводов. Из данного весового количества угля производится

определенное весовое количество светильного газа; теплотворная способность газа относится к приведенному объему, т. е. к весу газа. Следовательно, целесообразно указывать выход газа и в весовом обозначении. Если количество газа указывается в неприведенном объеме, то теплотворную способность также не следует давать приведенной (Л.).

§ 89. Поплавковые расходомеры. В поплавковых измерителях поплавок увлекается потоком и при этом меняется площадь отверстия, а это служит мерилom протекающего количества. Изображенный на рис. 214 конусный измеритель пригоден преимущественно для производственного контроля. Он в основном состоит из слабо конической, расширяющейся кверху стеклянной трубки, в которой может перемещаться поплавок. Притекающий снизу стеклянной трубки газ подымает поплавок, кольцевой зазор в достаточной степени увеличивается и потеря давления в нем уменьшается настолько, чтобы поддерживать вес поплавка. По положению последнего указывается проходящее количество,

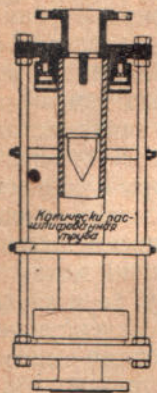


Рис. 214. Конусный измеритель.

причем шкала градуируется преимущественно в единицах объема; градуировка прибора в литрах зависит, однако, от плотности газа. Необходимые сведения об этих приборах можно получить в § 90 и 92, так как теория конусных измерителей аналогична теории поплавковых парометров, в особенности типа Байера. Так, например, если отсчитанное показание равно $80,2 \text{ л/сек}$, при плотности газа по отношению к воздуху в 1,06, и если градуировка производилась воздухом, то действительное прошедшее количество газа равно:

$$80,2 \cdot \sqrt{\frac{1,00}{1,06}} = 77,8 \text{ л/сек.}$$

Если, кроме того, температура проходящего газа была в 40° и давление—720 мм ртутного столба, в то время как градуировка производилась при 20° (соответственно нормальным условиям) и при давлении 760 мм ртутного столба, то проходящее количество будет равно:

$$80,2 \cdot \sqrt{\frac{1,00}{1,06}} \cdot \sqrt{\frac{313}{293}} \cdot \sqrt{\frac{760}{720}} = 82,7 \text{ л/сек.}$$

Градуировка может производиться для любого газа или жидкости, а также, например, для сжатого воздуха, для определенного давления; если же намерены всесторонне использовать прибор в лаборатории, трубку целесообразно снабдить простыми миллиметровыми делениями. Область измерения вообще равна 1:10, т. е. в измерителе с максимальной пропускной способностью в 20 л/сек поплавок начинает приходить в движение при расходе в 2 л/сек ; его ход вверх и вниз ограничен несколько упругими упорами и действительная длина хода равна 700 мм. Чтобы поплавок стоял спокойно, в аналогичной конструкции вращающегося измерителя, верхний обод снабжен несколькими бороздками с крутым наклоном, представляющими в некотором роде витки винтовой нарезки. Под действием газа, проходящего через бороздки, поплавок приходит во вращательное движение; поэтому он приобретает, с одной стороны, свойства волчка, сопротивляющегося всякому отклонению своей оси вращения, с другой—поплавок не может прилипнуть к стеклу. Пара плоских, нарисованных на цилиндрической части, оборотов винта делают вращение видимым. Поплавковый указатель количества, изображенный на рис. 215, служащий преимущественно для измерения количества питательной воды, базируется на том же принципе, но только его рабочие части изготовлены из металла. К поплавковым измерителям относятся также некоторые распространенной конструкции парометры, которые применимы и для сжатого воздуха, газа и жидкости. Один из таких

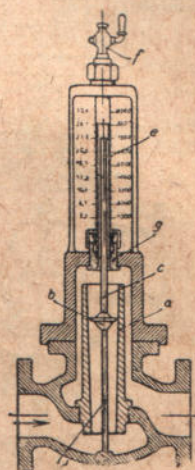


Рис. 215. Указатель питания котла, фирмы «Грефе».

поплавковых измерителей изображен на рис. 216. Притекающая справа жидкость попадает в нижнее полушарие и потом через расширяющееся кверху коническое измерительное сопло идет к выпускной трубе. В измерительном сопле может вертикально перемещаться круглая шайба — поплавок; ее положение регистрируется пишущим штифтом на бумажной ленте в зависимости от времени. Под действием нагрузки поплавок стремится занять свое нижнее, конечное положение, где он заполняет поперечное сечение сопла и в которое он обратно падает, когда течение пара через измеритель прекращается. Протекающая через измерительное сопло жидкость подымает поплавок до тех пор, пока благодаря расширению сопла кольцевой зазор вокруг поплавка достаточно увеличивается и потеря давления в поплавке настолько уменьшится, что наступит равновесие

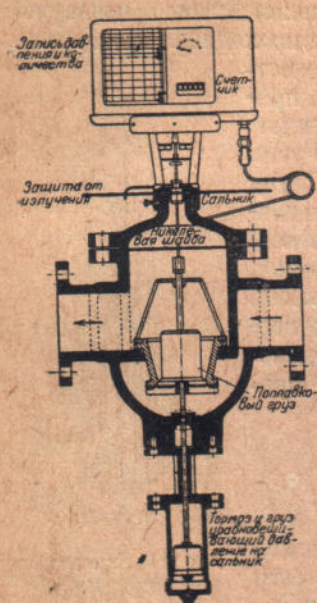


Рис. 216. Поплавокный паромер системы Байер-Сименса.

с измеряющей силой нагрузочного веса (Л.). Прибор Байер-Сименса, сконструированный фирмой красок «Байера», изготовившей для собственных нужд несколько сотен таких приборов, в настоящее время изготавливается в серийном масштабе фирмой «Сименс и Гальске»; серьезным достоинством этого прибора является возможность проверки его конечной точки во время эксплуатации. С этой целью помещенная над измерительным соплом промежуточная вставка выполнена не только как направляющее устройство, но так же как и конечный упор, который совместно с начальным упором представляет поплавок определенную, измерительную длину хода (преимущественно 100 мм). Если, придерживая пишущий механизм, подтянуть поплавок к конечному упору, то пишущий штифт должен всегда указать на определенную черту на диаграммной бумаге, иначе необходимо выверить установку штифта. В начальное положение поплавок оттягивать нельзя, потому что тогда поток пара будет заперт, в результате чего у поплавка возникнет большая разность давления. Проверку нулевой точки можно производить, следовательно, только с выключением паропровода, т. е. устрой перерыв в работе, и заменить ее можно проверкой конечной точки. Серебряный штифт пишет на специально изготовленной бумаге, применяемой для художественного печатания и для индикаторных диаграмм; применение

чернил из-за температурных условий исключено; хорошие результаты дает применение твердых карандашей для записи на обыкновенной бумаге, но недостаток их заключается в быстром износе. Диаграммы планиметрируются (§ 23) в случаях, указанных на рис. 216, результаты получаются посредством суммирующих устройств (рис. 50). Самопишущий пружинный манометр обычной конструкции (при измерении воздуха или пара и колеблющемся давлении) устанавливается таким образом, чтобы он записывал на том же листе бумаги сверху, кривой количество пара давление p_2 . Можно по отсчитанному на счетчике числу, учтя температуру, внести поправки в показания, пользуясь табличными данными

Снаружи движение поплавка направляется сальником, который обычно не создает затруднений в работе и трение которого, в сравнении с имеющимися переставляющими силами, практически незначительно. Тормозной поршень (цилиндр которого во время измерения пара наполняется водой, а при измерении воздуха должен наполняться водой заблаговременно) служит для замедления быстрых движений поплавка, происходящих под действием ударов водных капель, иначе диаграмма становится размазанной. Опасность замерзания воды в тормозном цилиндре незначительна, в виду близости его к обогреваемому корпусу паромера. Сальник ведет к заметной зависимости результатов измерения от давления — помимо общего влияния согласно равенства (2). Так, в паромере для трубы диаметром в 80 мм, груз, помимо веса частей передачи, весил 2,18 кг. Проволока, проходящая через сальник наружу, имеет в диаметре 2 мм, т. е.

0,0314 см² в поперечном сечении; на площадь проволоки действует сила, выталкивающая поплавок наружу и которая должна вычитываться из веса. Эти дополнительные и разнодействующие направляющие силы равны:

Избыточное давление (ат)	Дополнительная сила (кг)	Общий вес (кг)
1	0,031	2,21
5	0,157	2,34
15	0,471	2,65

Таким образом, дополнительные силы довольно значительны. Однако, при составлении таблиц поправочного коэффициента χ (стр. 214) их можно теоретически учесть достаточно точно; паромер подгоняют к нормально действующему рабочему давлению посредством смены легко вмещающегося в тормозной цилиндр вспомогательного груза, который весит 0,157 кг, если паромер предназначен для пара до 5 ат избыточного давления. Это труднее осуществить для измерителя количеств жидкости, предназначенного для избыточного давления в 5 ат, потому что направляющая сила подъема в данном случае равна уже 2,34 кг. Вполне понятно, что влияние сальника в более крупных типах паромеров значительно меньше.

Паромеры Байер-Сименса изготавливаются для присоединения к трубам диаметром 25, 50, 80а, 80б, 100, 150 и 200 мм, из которых каждый последующий имеет двойную пропускную способность предыдущего; так паромер 80а, к которому относятся табличные данные, пропускает от 725 до 1207 кг/час пара при температуре 250° и избыточном давлении от 5 до 15 ат.

Пример. Пусть поверхность поплавка, на которую действует пар, равна $f = 50,3 \text{ см}^2$; при максимальном его ходе $l_1 = 100 \text{ мм}$, считая от нулевого положения, для прохода пара через кольцевой зазор имеется в распоряжении поперечное сечение $F = 69,7 \text{ см}^2$, уменьшенное на площадь поплавка, т. е. $F - f = 19,4 \text{ см}^2$. На поплавок действует внешняя направляющая сила $P_a = 2,18 \text{ кг}$, давление и удельный вес пара перед поплавком соответственно равны p_1 и γ_1 , и в кольцевом зазоре получается падение давления Δp , так что сзади поплавок давление равно $p_2 = p_1 - \Delta p$.

Условие равновесия поплавка требует, чтобы:

$$f \cdot \Delta p = P_a, \quad (3)$$

следовательно, потеря давления в поплавке равна $\Delta p = \frac{P_a}{f} = 0,0434 \text{ ат} = 434 \text{ кг/м}^2$.

Заменяя в равенстве (2) значение f через $(F - f)$, получим:

$$G = \alpha \cdot (F - f) \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{P_a}{f} \gamma_1}. \quad (4)$$

При 250° и 6 абсолютных атмосферах $\gamma_1 = 2,48 \text{ кг/м}^3$; при $\alpha = 1$, G становится равным $0,2825 \text{ кг/сек} = 1080 \text{ кг/час}$ и так как максимально протекающее количество пара равняется 725 кг/час, как указано выше, то коэффициент истечения равен: $\alpha = 0,71$.

Величины под корнем являются постоянными. Если α — неизменная, и если ход l системы поплавка от нулевого положения пропорционален весу G пара, то: $l = K \cdot (F - f)$.

Кольцевая поверхность, окружающая поплавок, должна возрастать линейно, а диаметр, следовательно, по параболическому закону. Сопло имеет форму полого, усеченного параболоида вращения, длиной l_1 . Если при этом кольцевая поверхность при конечном положении поплавка равна впускной поверхности сопла, так что максимальное поперечное сечение сопла будет равняться двойному его минимальному (входному) сечению, то вершина параболоида находится на расстоянии l_1 от начала насадки. В отношении чувствительности поплавковые измерители вполне удовлетворительны. Согласно принятому на рис. 7 обозначению, внешняя направляющая сила поплавковых расходомеров P_a постоянна и именно (кроме действия давления пара на поверхность сальника) равна неизменному противодействующему грузу. Таким образом $dP_a/dl = 0$. Далее

$P_a = f \cdot \Delta p$, т. е. $\frac{dP_a}{dl} = f \cdot \frac{d\Delta p}{dl}$. Вычисление дроби производится следующим образом: после того, как соответствующим выбором профиля конуса, l и G (собственно говоря: l и $\sqrt{G \cdot V}$) были сделаны друг другу пропорциональными, то при соединении в одну константу K_1 всех неизменных величин, для измерителя действительно, очевидно, следующее равенство:

$$\Delta p = K_1 \cdot G^2 \cdot l^{-2}.$$

Дифференцируя при постоянном G , получаем:

$$\left(\frac{d\Delta p}{dl}\right)_G = -2K_1 G^2 \cdot l^{-3}.$$

Из обоих равенств следует

$$\frac{d\Delta p}{dl} = -2 \cdot \frac{\Delta p}{l}.$$

Вследствие этого

$$\frac{dP_i}{dl} = -2f \cdot \frac{\Delta p}{l}$$

и, согласно равенства (5), имеем также (при величине $dP_a/dl = 0$)

$$R_1 = 2 \cdot f \cdot \frac{\Delta p}{l}. \quad (5)$$

Таким образом, при неправильной установке поплавка, освобождающаяся перестанавливающая сила обратно пропорциональна ходу l поплавка. Вблизи нулевой точки поплавка перестанавливающая сила очень велика, и поплавок тогда устанавливается наиболее точно в свое должное положение; точность измерения вообще *везде относительно* одинаково велика. Этот результат подтверждается опытом. Если, при неизменном течении пара, попробовать нажать на поплавок вниз, то вблизи нулевой точки нажатия оказывают сопротивление большие силы; во всяком случае эти последние не бесконечно велики, как дает формула (5) для $l = 0$. Так как тогда поплавок закрывает зазор, то через паромер больше не проходит неизменное количество пара. Предположение, на основании которого мы сделали настоящий вывод, касается только незначительных отклонений от должного положения поплавка, но, конечно, не для $l = 0$. Поплавковый измеритель особенно хорошо можно использовать, и он даже является незаменимым в тех случаях, когда производится длительный скрытый отбор пара. Кроме хода поплавка l , перестанавливающая сила зависит еще и от величины $f \cdot \Delta p$, т. е. от направляющего груза и увеличивается с увеличением этого груза. Это, однако, не значит, что с увеличением груза в одном и том же измерителе точность его измерения также увеличивается; хотя от этого отклонения поплавка от должного положения и уменьшаются, но при этом уменьшается и полезный ход и точность в результате остается той же. С увеличением направляющего груза, предел измерения паромера, а также его потеря давления вообще повышается; точность измерения повысится только в том случае, если вместе с тем установить насадку с меньшим нарастанием площади сечения. Точность зависит кроме того и от точности планиметрирования, которое в наших рассуждениях не было принято во внимание. Планиметрирование становится неточным, если пишущий штифт начинает прыгать и потому пишет широкую, расплывчатую линию, что имеет место при установке у поршневой паровой машины, вследствие ее обратного хода, и при влажном паре, когда легкий поплавок приходит в движение от удара всякой водяной капли. У определенного поплавкового измерителя абсолютная точность измерения возрастает с уменьшением количества пара и подъема поплавка; это характеризует паромер как идеальный прибор. Далее будет указано, что дроссельные измерители в этом отношении совершенно неудовлетворительны. Другим преимуществом поплавковых паромеров является то, что они работают с незначительной потерей давления; использованная потеря давления, которую создает поплавок (и служащая для измерения), равна частному от деления внешней направляющей силы на поверхность поплавка. Эта потеря давления в паромере Байера-Сименса равна почти $0,05 \text{ ат}$ и остается неизменной при всяком расходе пара. К этому

добавляются дополнительные потери давления при отклонении струи в корпусе паромера. Эти потери увеличиваются с квадратом количества пара, так что общая потеря давления при максимальном расходе пара повышается до 0,15 ат. Средняя потеря давления является руководящей для определения потери энергии в работе двигателя, максимальная потеря давления — для определения снижения производительности, претерпеваемого паропроводом при установке в нем паромера.

§ 90. Дроссельные паромеры состоят из установленного в трубопроводе дроссельного устройства. Действующее давление по обе его стороны является мерилom протекающего количества. Действующее давление приводит в действие дифференциальный манометр, показания которого соответствуют квадратным корням из перепада давления (§ 32). Этот манометр указывает или записывает мгновенные количества пара или передает показания на расстояние, или, наконец, суммирует протекающее количество пара. Имея в виду, что отдельные элементы таких измерителей нами были уже описаны ранее (в § 32, 78, 79), здесь остается лишь упомянуть о некоторых основных положениях относительно их взаимодействия для данной цели. Совокупность этих элементов может рассматриваться как дроссельный паромер, если они остаются продолжительное время установленными вместе, в то время как при приемных испытаниях они устанавливаются лишь временно (Л.). В качестве датчиков действующего давления применяются нормальные сопла или диафрагмы, а также нормальные или укороченные трубы Вентури. Ввиду дороговизны, последние применяются только в тех случаях, когда приходится сильно экономить давление (§ 93). Совокупность такого устройства называется также дроссельной установкой или просто дросселем. Трубка,

соединяющая датчик действующего давления с измерителем последнего, должна быть снабжена выравнителем уровня, если приходится считаться с образованием в трубке переменных количеств влаги и вредных водяных столбов. Это следует иметь в виду при измерении количества пара, а часто также и газа. Выравнивание уровня лучше всего осуществляется посредством двух *уравнительных сосудов*. Последние помещаются выше дросселей. Слив целесообразно делать согласно рис. 102 и он должен находиться на той же высоте, что и уравнительные сосуды. Трубопровод, соединяющий дроссель с уравнительным сосудом, должен подниматься к последнему постепенно и иметь достаточно широкий диаметр, во избежание накопления в нем воды (рис. 217). Точно также необходимо, чтобы отборочные отверстия на дроссельном устройстве были просверлены, во-первых, так, чтобы нижние края этих отверстий совершенно совпадали с нижним краем отверстий отборочной трубки (если последняя не отводится наискось вверх), и во-вторых, отборочные отверстия должны быть настолько широкими, чтобы капли в них не могли задерживаться благодаря капиллярности. Это относится, главным образом, к газам, так как у пара поверхностные силы около точки кипения весьма незначительны. Так как, с другой стороны, отбор должен производиться в краю угла, то это условие для трубопровода незначительного диаметра нарушается, если отборочное отверстие слишком велико; тогда надо держаться середины; во всяком случае при диаметре трубопровода в 8 мм капиллярность невелика (Л.).

Поверхность уравнительного сосуда должна быть настолько большой, чтобы колебания уровня со стороны, куда возвращается ртуть, были незначительны в сравнении с разностью давлений. Из этих соображений уравнительная трубка прокладывается на протяжении 5—7 м прямо или свернутой в спираль (рис. 70), так как колебания уровня в них вовсе не возникают, но зато из них хуже удалять воздух (очень важно!). Уравнительные сосуды, установленные в вертикальном трубопроводе, служат для выравнивания разницы положений по высоте обоих отборочных отверстий; уравнительные трубки в таких случаях не при-

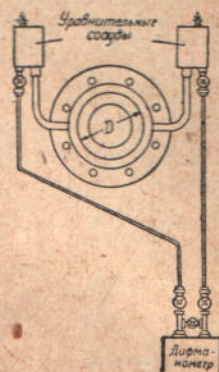


Рис. 217. Схема трубопровода, соединяющего дроссель с измерительным прибором преимущественно для измерения пара.

меняются. В соединительных трубках при измерении пара или при более высоких давлениях устраиваются запорные краны в количестве 5 штук: из них по одному крану для закрытия обоих трубопроводов после датчика действующего давления, один кран — после измерителя и по одному крану следует установить в соединительном трубопроводе по обе стороны измерителя. Проверку нулевой точки прибора можно произвести, выключая трубопровод и открывая соединительный трубопровод. Необходимо, чтобы каждый трубопровод мог с обеих сторон закрываться; датчик необходимо выключать для исправлений; у измерителя необходимо закрывать трубопровод, если желательна его продувка, что часто необходимо при измерениях количества пара для удаления воздуха из паропровода. Очень важно, в особенности для пара, чтобы паропровод был совершенно свободен от воздуха, что достигается заполнением измерителя до обоих краев и соединением его с только что продутым паропроводом, когда пар еще слабо дует; тогда трубы наполняются сконденсированной водой. Из последней газ также выделяется, что вредит временами. Сосуд для уровня снабжен воз-

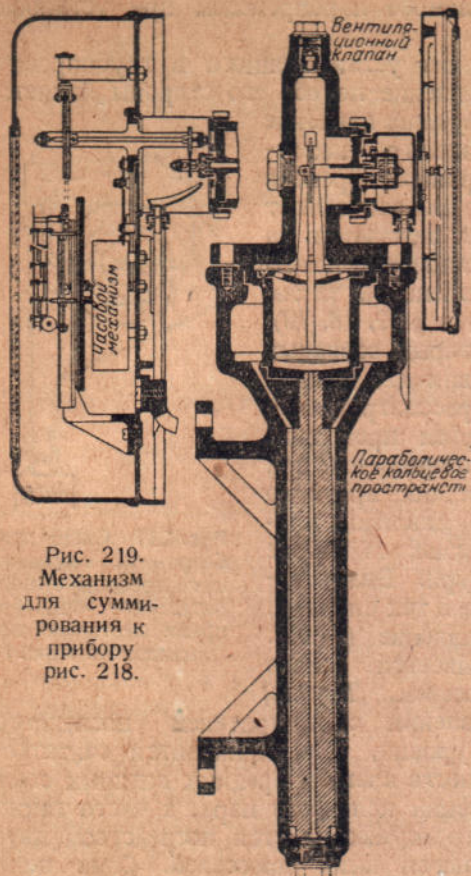


Рис. 219. Механизм для суммирования к прибору рис. 218.

Рис. 218. Указывающий расходомер $\frac{1}{8}$ натур. величины, фирмы «Бопп и Рейтер»

дувать в соединительном трубопроводе по обе стороны измерителя. Проверку нулевой точки прибора можно произвести, выключая трубопровод и открывая соединительный трубопровод. Необходимо, чтобы каждый трубопровод мог с обеих сторон закрываться; датчик необходимо выключать для исправлений; у измерителя необходимо закрывать трубопровод, если желательна его продувка, что часто необходимо при измерениях количества пара для удаления воздуха из паропровода. Очень важно, в особенности для пара, чтобы паропровод был совершенно свободен от воздуха, что достигается заполнением измерителя до обоих краев и соединением его с только что продутым паропроводом, когда пар еще слабо дует; тогда трубы наполняются сконденсированной водой. Из последней газ также выделяется, что вредит временами. Сосуд для уровня снабжен воз-

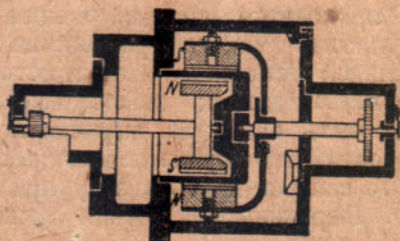


Рис. 220. Магнитное сцепление для вывода наружу показаний из пространства, находящегося под давлением.

душными кранами, которые хорошо соединять посредством небольших трубок, через которые воздух постоянно удаляется, вследствие существующей между ними разности давления (действующего давления); трубопровод должен быть малым в сравнении с подводом к датчику, чтобы этим не вызвать ошибочности в показаниях действующего давления. Не следует закрывать дифференциальный манометр с обеих сторон, так как в противном случае стеклянная трубка легко трескается.

При измерении количества пара, соединительные трубки, но не широкие паропроводы, подвергаются опасности замерзания. Поэтому при установке дросселя на открытом воздухе измерительный прибор, а также уравнильные сосуды следует устанавливать в закрытых помещениях. В качестве указывающего прибора для дроссельных измерителей служат дифференциальные манометры всех типов (§ 30); согласно методов, изложенных в § 32, все эти манометры должны указывать величину квадратного корня из перепада давления. Некоторые из таких конструкций показаны на рис. 218—222. На рис. 218 эта квадратичная зависимость достигается формой ртутного сосуда; в аналогичной конструкции «Сименс и Гальске», а также «Гартмана и Брауна» сальник заменен магнитным поворотным сцеплением (рис. 220). Для суммирования прибор рис. 218

изменен согласно рис. 219, для чего применяется фрикционный ролик. Вместо этого «Сименс и Гальске» применяет очень компактные, с принудительным движением, но не непрерывно действующие счетные механизмы, указанные на рис. 50. Для передачи показаний на расстояние применяются приборы с вращающимся железным кольцом, как на рис. 29, в то время как «Сименс и Гальске» использует для этой цели передатчик с кольцевой трубкой (рис. 24), для переменного же тока, — передатчик, указанный на рис. 31.

Аналогичным по конструкции является измеритель количеств (воды, пара, газа и воздуха) под названием «Мандекс» (рис. 225). По принципу действия он является ртутным U-образным манометром. При повышении разности давления ртуть в камере давления понижается и переходит в сообщающуюся камеру с поплавком. Последний подымается и начинает поворачивать насаженное на зубчатой рейке магнитное сцепление и приводит в действие стрелку прибора. В виду параболической формы плунжера, подъем поплавка соответствует известной квадратичной зависимости как в отношении эффективности давления, так и количества. Передача показаний наружу осуществляется посредством магнитного сцепления, конструкция которого заключается в следующем: четыре мощных, подковообразных магнита передают движение оси измерительного механизма. Оба внутренние магнита приводятся в действие подъемом поплавка и захватывают наружные магниты, которые поворачивают ось стрелки. Таким образом, передача показаний из камеры давления осуществляется без сальника. Вследствие этого, появление неплотностей, а также погрешности от трения даже при самом высоком давлении в данных приборах исключаются. (Прим. перевод.).

На рис. 221—222 даны конструктивные оформления еще двух измерителей количества, — одного для очень высокого давления, другого, изготовленного из жести, для низких давлений. Были сделаны попытки применения дифференциальных манометров с мембраной, с целью избежать крайне стеснительного применения ртути; но этого не удалось достигнуть ни для одной из этих конструкций, так что для измерителей, за исключением очень низких давлений, вынуждены все таки пользоваться ртутью. На рис. 223 измерительным прибором служит обыкновенный ртутный столб, высоту которого можно, конечно, просто отсчитывать, но который прежде всего служит для замыкания ряда, состоящего из 39 впаянных в стеклянную трубку электрических контактов. Между контактами включены катушки, сопротивление которых при повышении столба последним замыкается накоротку. При этом расстояния между контактами и сопротивлениями согласованы таким образом, что возникающий ток пропорционален квадратному корню из высоты столба ртути, так что электрический счетчик непосредственно указывает количество пара. При таком переходе на электрический ток можно удовлетворительно производить исправление указываемых и в особенности отсчитываемых количеств по давлению и температуре. Впрочем давление можно просуммировать довольно удовлетворительно механически в месте с количеством протекающего пара, посредством механизма, показанного на рис. 39—41; две поправки таким образом едва ли можно было бы ввести, да и кроме того для температуры нет подходящего воспринимающего органа. Пособием схемы соединения, изображенной на рис. 223, показания

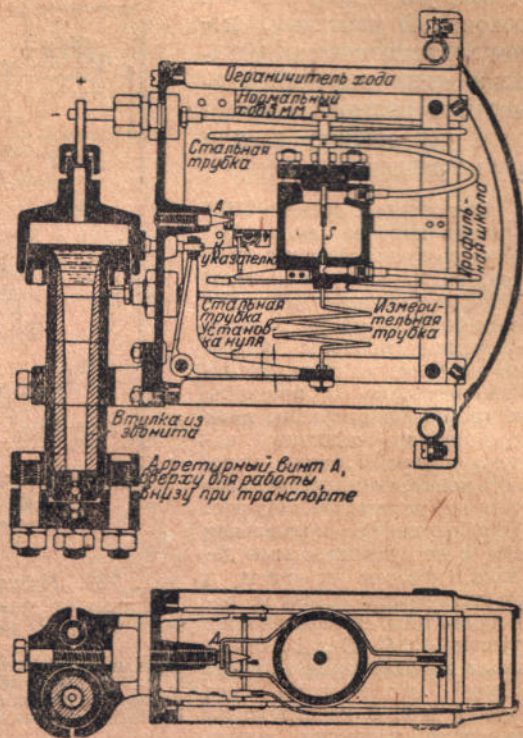


Рис. 221. Расходомер для высоких давлений, сконструированный в виде профильного прибора, действующий по принципу последовательного наполнения (наполнитель — ртуть) $\frac{1}{6}$ натур. величины, фирмы «Аскания».

поднимающихся ртутных столбов соответственно исправляются; влияние температуры t и давления p учитывается посредством схемы, описанной на рис. 224. Вместо автоматически действующих при этом p и t можно установить сопротивление, регулируемое от руки соответственно обеим величинам. Такой прибор стоит дешевле и для регулярных установок имеется постоянный работник, поэтому автоматические установки из-за высокой стоимости в настоящее время почти совершенно вышли из употребления.

За последнее время в США получили широкое распространение электрические измерители (пара, воды, воздуха и газа) различных конструкций. Довольно большой популярностью пользуются приборы фирмы «Браун». Передача этих измерителей построена на принципе самоуравновешивающейся цепи индукционного мостика, помощью которой можно передавать показания электрическим путем на расстояние. На рис. 227 изображена принципиальная схема с ее существенными деталями, которая включена в соответствующий источник переменного тока. Внутри четырех катушек A, B, C и D , соединенных в одном конце O , могут свободно перемещаться два якоря 1 и 2 . В конструкции измерителя мощности потока Брауна, якорь 1 с катушками

A и B помещен в манометре, причем движение якоря соответствует изменению мощности потока. Якорь 2 с катушками C и D помещен в показывающий и самопишущий приборы. Когда оба якоря находятся в среднем положении (как это изображено на рис. 227), в рамках цепи мостика существует электрическое равновесие и в точке O не проходит никакого тока. Изменение давления в манометре вызывает перемещение якоря 1 из катушки B в катушку A , вследствие чего индукция катушки A увеличивается, а катушки B соответственно уменьшается и ток начинает течь через точку O , увеличивая ток, протекающий в C . Так как ток в катушке C превышает ток катушки D , то якорь 2 начинает перемещаться из D в C . Движение якоря 2 повышает индукцию в катушке C , пока в цепи вновь не установится электрическое равновесие и тогда течение тока в O прекращается и токи в катушках A, B, C и D равны между собой. На рис. 228 дана схематическая диаграмма конструкции измерителя, показывающего и самопишущего приборов и их электрической коммутации. Как видно из диаграммы, в дифференциальном манометре, соединенном с трубопроводом подводными трубками, помещены две ветви индукционного мостика. Этот манометр соединен проводами также с указывающим прибором и комбинированным самописцем со счетным механизмом, в которых также расположены по две ветви индукционного мостика. Действие измерителя Брауна происходит в следующем порядке: течение пара через диафрагму производит разность давлений, которая через подводные трубки передается поверхности ртути в манометре. Чем сильнее течение пара, тем значительнее перепад давлений, в результате чего ртуть в одной камере манометра понижается, в другой повышается. В камере давления помещен поплавок из нержавеющей металла, плавающий на поверхности ртути. Движения поплавка приводят в действие якорь, помещенный в трубке из немагнитного сплава; изменения в положении якоря вызывают соответственные изменения в магнитном поле, окружающем трубку индукционной катушки и в свою очередь вызывают соответственные перемещения якорей в приключенных к манометру приборах. Таким образом, движение якорей катушек в приборах совершается синхронно с якорем катушки в манометре и показания приборов варьируют в соответствии с изменением величины мощности потока в трубопроводе. Эти приборы обладают рядом следующих серьезных преимуществ. Их показания не зависят от колебаний напряжения сети до 30% и выше. Для коммутации этих приборов достаточно всего три провода (вместо 8 и более проводов, необходимых для передатчиков постоянного тока Сименса, Гартмана и Брауна, и др.). Отсутствуют электрические контакты, могущие вызвать искрение в приборе, а также отсутствуют сальники внутри

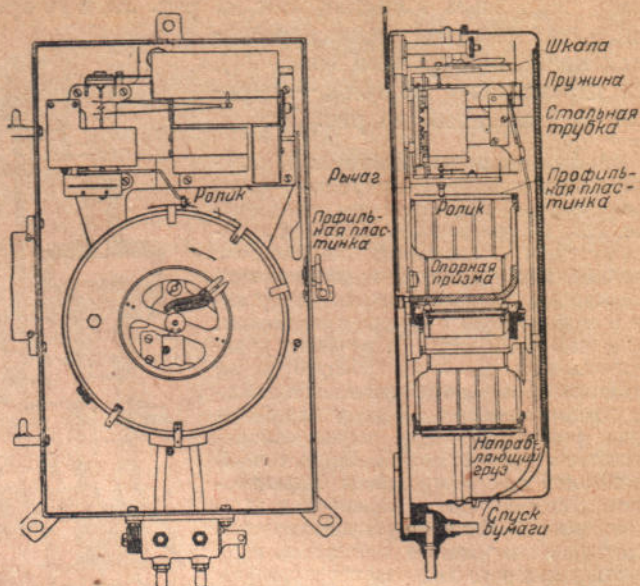
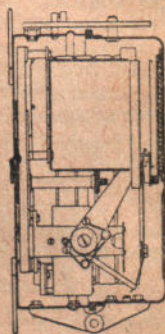


Рис. 222. Измеритель количеств для низких давлений с кольцевыми весами из жести.

Наполнение — парафиновое масло или т. п. При смене направляющего груза изменяется предел измерений; $1/10$ натур. величины, фирмы «Гартман и Браун».



камеры давления. Приборы Брауна изготовляются как для низкого, так и для высокого давлений. Вторичные приборы могут находиться на расстоянии 1 км и более от первичного прибора без заметного влияния расстояния на точность и надежность показаний. (Прим. перев.).

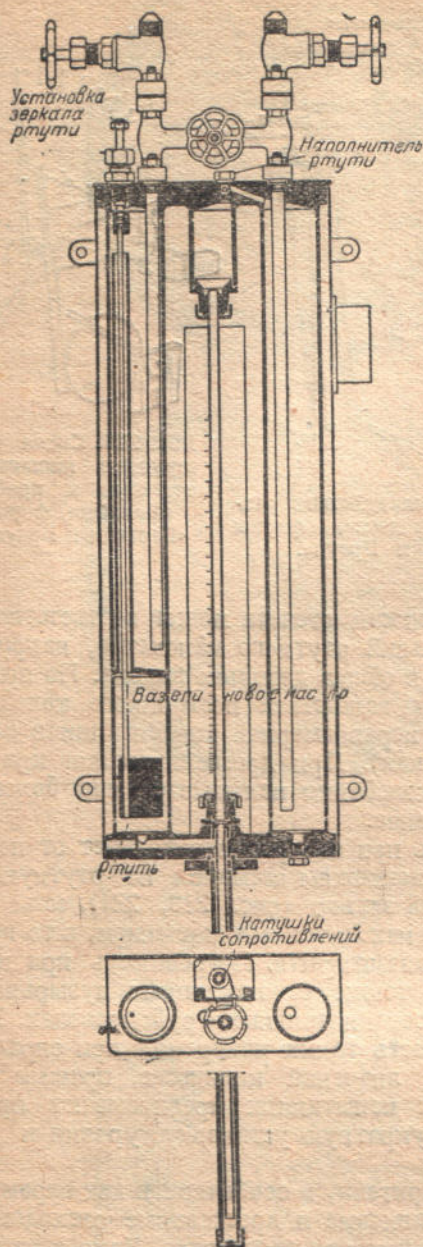


Рис. 223. Электрический датчик сопротивления $1/8$ натур. величины, фирмы «Гальвакс и Ланген».

В приборах с ртутными контактами (рис. 224), применяемых как указатели количества, необходимо следить за тем, чтобы при повышении ртутных столбов

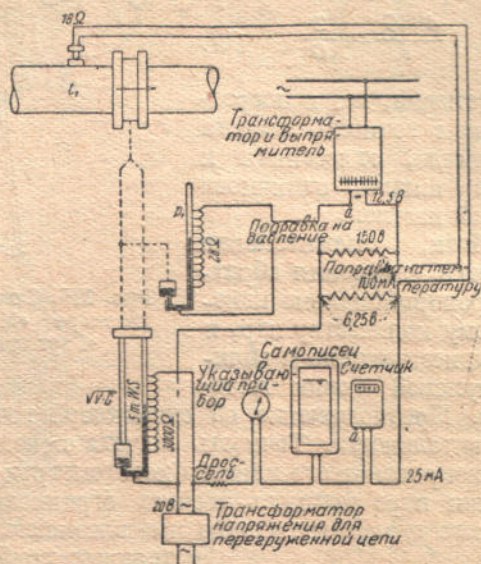


Рис. 224. Поправка на давление и температуру к прибору рис. 223. Соединение клемм *aa* дает поправки на сопротивление при пуске в ход счетчика.

вода не покрывала последние, ибо при постоянном токе возможен электролиз, а при переменном токе возможно возникновение помех. Поэтому при пуске прибора в ход, весь сосуд (рис. 223) сперва заполняется чистым парафиновым маслом, частично вытесняющим ртуть. Совершенно очевидно, что такие наполняющие жидкости для ряда контактов должны быть диэлектриками, не должны смешиваться с водой, а также не должны образовывать эмульсий. Кроме того, обе жидкости должны иметь совершенно различный удельный вес. С другой стороны, только при одинаковом удельном весе обеих жидкостей перемещение границы зеркала между заполняющей жидкостью и водой не мешает измерению. Вместо парафинового масла J. G. Фарбениндустри рекомендует трикрезилфосфат, который тяжелее воды, что должно иметь место при устройстве, указанном на рис. 223.

Для точной передачи тока при низких напряжениях налагается, как показано на рис. 224, вспомогательное переменное напряжение, которое должно пробиывать переходное сопротивление контактов. Измерительные приборы защищены от этого напряжения посредством дроссельной катушки. В отношении точности дроссельные паромеры являются неудовлетворительными в случаях, когда измеряемое количество пара подвергается сильным колебаниям, вплоть до скрытой

утечки. Это находит свое обоснование в квадратичной зависимости, потому что высота ртутного столба $l = C \cdot G^2$, где C — постоянная. Таким образом, $dl = 2 \cdot C \cdot G \cdot dG$ и после деления получаем

$$\frac{dl}{l} = 2 \cdot \frac{dG}{G}. \quad (6)$$

Отсюда относительная точность будет равна

$$\frac{dl/dG}{l} = \frac{2}{G} \quad (7)$$

при условии, что непосредственная точность отсчета по шкале, отнесенная к длине l шкалы, одинакова по всей шкале.

Итак, относительная точность измерения обратно пропорциональна измеряемому количеству пара и весьма незначительна вблизи нулевой точки манометра.

Предположение об одинаковой точности отсчета может соответствовать действительности. Точность отсчета показаний ртутного манометра, например, при визировании его мениска катетометром в общем довольно высока. Но при измерении пара точность отсчета ограничена вследствие постоянного колебания ртутного столба (возможно под влиянием неравномерной конденсации в соединительных трубках). При дросселировании кранами средняя точка колебания испытывает еще более заметное перемещение.

Погрешность при измерении возникает от потерь ртути, которые возможны несмотря на ртутную ловушку и ртутный затвор (рис. 218, 221), если одна сторона прибора находится под давлением, в то время как другая сторона открыта. Погрешность при измерении возникает также от воздушных пузырьков в поднимающихся соединительных трубопроводах. Учитывая ненадежность таких измерений при определении мгновенных значений количеств, правила (Л.) при приемочных испытаниях предписывают производить двукратный замер давления, двукратную установку уровня и двукратное измерение.

§ 91. Поплавковые и дроссельные измерители, в особенности как паромеры. Описанные в предыдущем параграфе поплавокные и дроссельные расходомеры нашли применение преимущественно при замере количеств пара. Даже в настоящее время измерение пара является наиболее важной областью их применения. Некоторые замечания относительно специфических случаев измерения пара были сделаны уже в предыдущем параграфе; некоторые же дополнительные замечания, касающиеся производственного контроля, могут быть отнесены к особым случаям измерения пара и служить для сравнительного анализа конструктивного оформления обоих типов измерителей (Л.). Паромеры служат для указания паропроизводительности котлов или котельных, а также для указания расхода пара потребителями. Можно удовлетвориться отсчетом потока пара, проходящего в данный момент через измерительную установку в $кг/сек$; такие измерительные приборы называются *указателями количества пара*. Иногда их называют также *паровыми часами*. Однако, со словом «часы» связано понятие о постоянно работающем, т. е. суммирующем приборе как в обыкновенных, так и газовых часах.

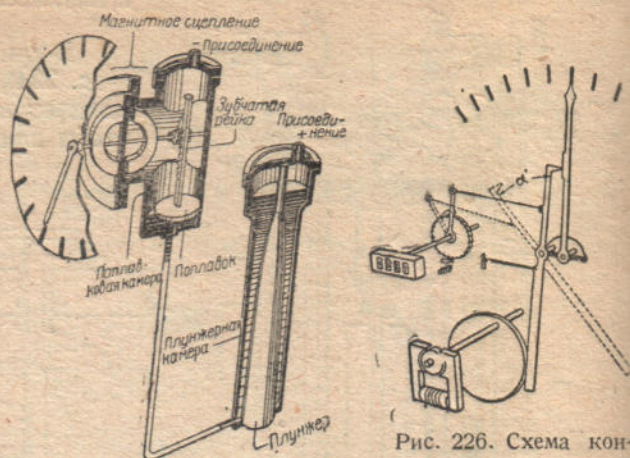


Рис. 225. Схема действия расходомера «Мандекс», фирмы «Гартман и Браун».

Рис. 226. Схема конструкции кнопочного счетчика к прибору «Мандекс», фирмы «Гартман и Браун».

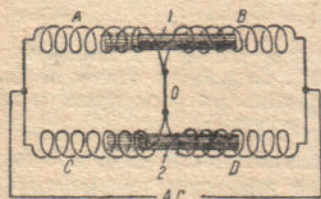


Рис. 227. Принципиальная схема самоуравновешивающейся цепи индукционного мостика, фирмы «Броун».

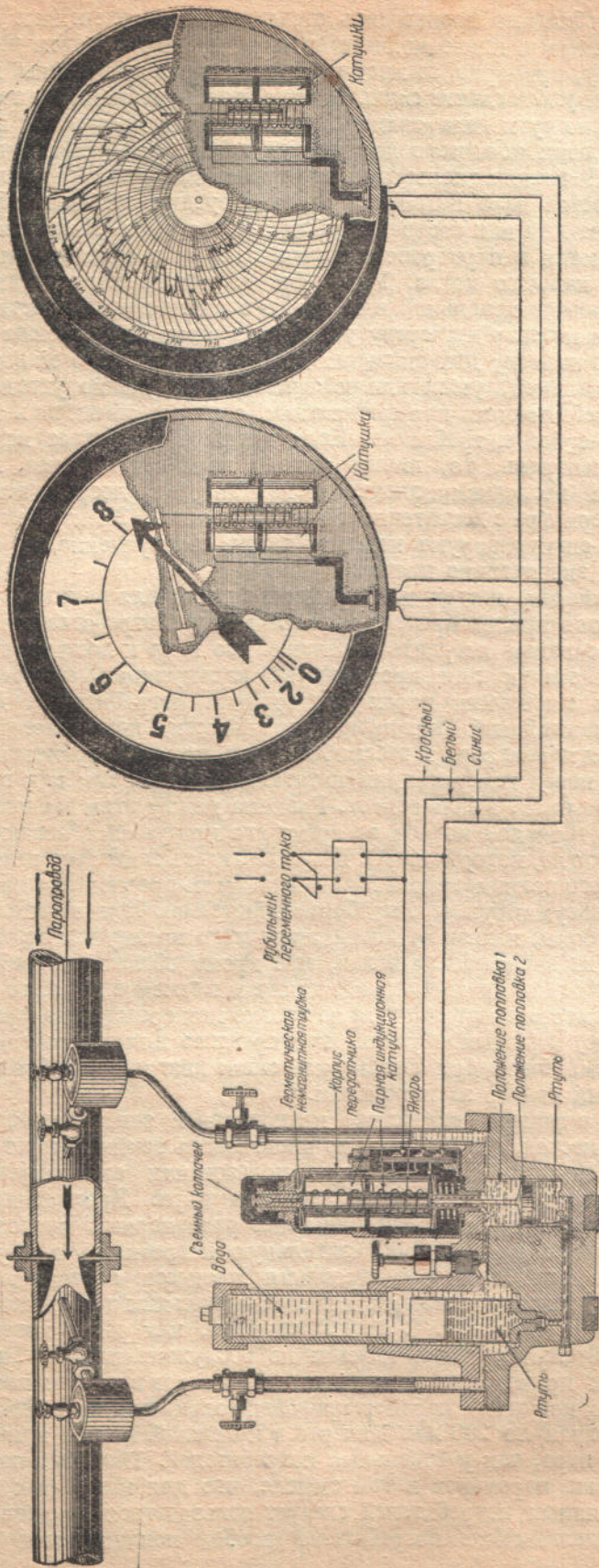


Рис. 228. Схематический рисунок электрического измерителя мощности потока, фирмы «Брун», включающего манометр, показывающий и самопишущий прибор и их электрическую коммутацию.

Движение поплавка манометра передается магнитным путем. В намере давления помещены ртуть и поплавки. Провода и прочие электрические части отсутствуют.

Поэтому, если необходимо производить отсчет через определенные промежутки времени для выяснения, какое количество пара прошло в целом через измерительную установку, примерно, за месяц, то такие приборы должны именоваться *паромерами в более узком смысле слова*. Однако, до сего времени все такие измерительные приборы по сути дела являются указателями количества пара, и суммирование прошедших количеств достигается только окольным путем, указанным в § 88 и 89. Попытки использовать вертушки или водомер Вольтмана для измерения количества пара потерпели однако неудачу, главным образом из-за трудностей подбора для них соответствующих материалов. Указатели количеств пара устанавливаются в паропроводе каждого котла в отдельности для равномерной загрузки каждого котла. Указатели количеств пара устанавливаются в главном паропроводе котельной или каждого котла в отдельности еще и для того, чтобы по нем кочегар мог сразу установить изменение расхода пара, но не судить об этом по подъему или снижению давления пара, чего он вообще не должен допускать; наконец, указатели количеств пара можно установить перед отдельными, потребляющими пар аппаратами, с целью обеспечить их надлежащее, но не чрезмерное потребление. Если котельная работает исключительно на одну электроцентраль, то, вместо расхода пара двигателями, лучше вести учет доставленной последними электрической энергии, посредством установки ваттметра и амперметра с достаточно большой шкалой. Электрические измерительные приборы сигнализируют кочегару также своевременно, но они дешевле и уход за ними значительно проще.

Подобно водомерам, настоящие паромеры служат для суммирования потока пара и применяются при распределении пара между потребителями как внутри большого завода с целью побудить отдельные его цеха к достижению экономии в расходе пара, так и для производства калькуляции его себестоимости, необходимой при снабжении паром сторонних потребителей. Для расчета ежедневной и ежемесячной паропроизводительности, котельные и отдельные котлы снабжаются паромерами и весами для угля, при этом применение паромера предпочтительно перед измерителями питательной воды, так как важно не поданное количество воды, а испаренное. Разница между этим количеством равна количеству воды, теряемой котлом во время его продувания, а также потерями от неплотности котла, которые порой могут достигать заметных величин. Недостатком ежедневного планиметрирования диаграмм по сравнению с простым отсчетом автоматически суммирующего прибора является его большая потеря времени.

С другой стороны, нельзя не дооценивать того преимущества, которое для парового хозяйства заключается в том, что кроме общего потребления пара становится известным его распределение также и в течение дня. Это важно в том случае, если паромер рассматривается не только как средство измерения потребляемого пара, но, главным образом, как средство для достижения экономии пара. Вместе с тем, благодаря ежедневной смене диаграммной бумаги обеспечивается регулярный надзор за паромером.

Дроссельные паромеры, вследствие квадратичной зависимости, непригодны для установки в местах, где желательно производить точный отсчет также и незначительных количеств, или если при пользовании самопишущими приборами возможны длительные скрытые расходы пара. Дроссельные паромеры пригодны, следовательно, при более или менее равномерных расходах или там, где желательно знать только приблизительную потребность в паре в данный момент, в особенности для регулирования процесса горения в котельных. В котельных нет опасности замерзания соединительных трубопроводов, за исключением периодов остановок. С другой стороны, как раз в котельных количество пара значительно, чем в каждом из обслуживаемых ею предприятий. В таких случаях применение поплавковых паромеров в котельных становится невозможным, так как такой паромер пригоден только для присоединения к трубопроводу диаметром до 200 мм. Как раз в котельной можно меньше ожидать скрытого отбора пара, чем у отдельных потребителей. Поэтому вполне справедливо подразделение паромеров в том смысле, что для котельных и для очень крупных и постоянных потребителей следует пользоваться дроссельными паромерами, для отдельных же потребителей вообще поплавковыми паромерами.

В подсчет диаграммы входит также величина удельного веса γ_1 , зависящая от давления p_1 и при перегретом паре еще от температуры t_1 . Поэтому необходимо определять p_1 , а при перегретом паре также T_1 и обе эти величины должны быть связаны величиной γ_1 . Если вычисления при этом желательно производить со средними величинами, то недостаточно среднюю величину по времени для p и T_1 отнести друг к другу; это сочетание p и T необходимо производить по отдельным точкам для определения хода изменения γ_1 ; отсюда надо выводить среднее значение γ_m . Кроме того, расчет γ_m не должен производиться просто по времени, но необходимо каждому значению γ_1 приписать свой вес, в зависимости от проходящего в данный момент количества пара (пока не вполне известного); кроме того необходимо найти среднее квадратичное значение. Вполне понятно, что постоянно производить такой кропотливый расчет невозможно. Поэтому удовлетворяются вычислением простого среднего значения p и T . При не очень сильных колебаниях этого вполне достаточно. При больших колебаниях имеет существенное значение автоматическая поправка на p и T , если она осуществляется прямо по точкам. Механически это разработано только для влияния давления, являющегося более важным, а для насыщенного пара даже единственным. Для этой цели ставят манометр, отклонения которого пропорциональны давлению p_1 и движения его связывают с движениями дифференциального манометра, посредством рычажного устройства подобно изображенному на рис. 40—41, таким образом, чтобы равнодействующее движение было пропорционально произведению $\sqrt{p_1} \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$. Это равнодействующее движение регистрируется тогда на бумажной ленте в виде диаграммы, которую можно планиметризовать. Соответствующие механизмы, как таковые (в математически-кинематическом отношении, а также в отношении хода) работают удовлетворительно; слабым местом является манометр. Поршневой манометр, подобно индикатору, имеет склонность к заеданию при движении поршня, трубчатые или мембранные пружины дают, однако, слишком незначительную перестанавливающую силу для приведения в действие передаточного механизма давления, их едва хватает для самопишущего манометра. По этим соображениям, в целях устранения неполадок в работе, мы считаем целесообразным избегать по возможности всех усложнений в паромерах, каковые, как уже упоминалось раньше, во всех конструкциях требуют постоянного надзора.

Поэтому мы рекомендуем использовать паромеры без автоматического выравнивания давления и подсчитывать диаграмму, учитывая одновременную запись прибора, регистрирующего давление. Теоретически этот метод менее точен, практически же он значительно превосходит применение механизмов для поправки на давление. *Простейший паромер является наиболее надежным и самым лучшим.* При перегретом паре необходимо еще учитывать и температуру, влияние которой значительно, так как при температурных колебаниях в пределах от 150 до 300° происходят относительные отклонения от 0,609 до 0,709 при средней величине 0,654, при 225° С, что составляет максимум $\pm 7-8\%$. Действительные средние отклонения будут значительно меньше вследствие выравнивания во времени. Можно сказать, что, несмотря на эту ненадежность, показания паромера все же ценны без записи температур; во всяком случае обеспечен лучший производственный контроль, чем без всякого измерения. Применение термографа или даже электрического устройства, указанного на рис. 45 для поправок на p и T значительно улучшает контроль.

§ 92. Подсчет диаграмм. Для регулярного подсчета многочисленных диаграмм самопишущих приборов или конечных показаний счетчиков целесообразно провести ход расчета так, чтобы из равенства (2) для изменяющихся весов G , протекающих за время z количеств, вывести равенство для веса протекающего пара G_2 , прошедшего через паромер в промежуток времени от z_1 до z_2 . В промежуток времени dz через паромер проходит Gdz кг и, интегрируя это значение от z_1 до z_2 , получаем:

$$G_2 = \int_{z_1}^{z_2} G \cdot dz = \sqrt{2g} \int_{z_1}^{z_2} k \cdot f \cdot \sqrt{(p_1 - p_2)} \cdot \sqrt{\gamma_1} \cdot dz \text{ кг.} \quad (8)$$

В зависимости от типа прибора можно вынести за знак интеграла, помимо $\sqrt{2g}$ и другие члены как константы. Затем можно свести формулу соответственно к трем множителям так, что подсчет в каждом отдельном случае будет производиться на основании равенства

$$G_z = \frac{M \cdot J}{X} \quad (9)$$

три величины которого определены из сравнения с равенством (8). Под обозначением J соединены те величины, интегральное значение которых дается счетным механизмом; таким образом, при самопишущем приборе J представляет площадь, обведенную планиметром. При пользовании прибором со счетчиком, J представляет разность показаний счетчика за время z_2 и z_1 . M является константой прибора, зависящей от типа паромера и применяемой его величины. При дроссельном паромере M изменяется от прибора к прибору с величиной и родом поставленного дросселя, а при самопишущем приборе M зависит от скорости хода часового механизма. Постоянная паромера относится к какому-нибудь состоянию пара, принятому как нормальное и характеризующему величиной γ_0 удельного веса. Отклонения величины давления и температуры от должной величины учитываются поправочным соотношением $X = \sqrt{\gamma_0/\gamma_1}$. Его значения колеблются около единицы и приводятся в поправочной таблице. Нормальные значения t_0 и p_0 целесообразно подбирать так, чтобы либо γ_0 , либо M представляли круглое число. В более крупных предприятиях J дается каждым прибором ежедневно. Постоянная прибора M характеризует разные, рядом применяемые приборы, а дневная постоянная X дает дневную характеристику пара для всех приборов. Здесь необходимо отметить, что для формул с тремя множителями, как формула (9), выражению $M \cdot J/X$ следует предпочесть выражению $M \cdot J \cdot X'$ при работе со счетной линейкой. Если считать в последовательном порядке $(M : X) \cdot J$, то достаточно одной установки движка линейки, между тем вычисление $M \cdot X' \cdot J$ требует двух установок движка. Для вычислений же по таблицам логарифмов и со счетной машиной выражение $M \cdot J \cdot X'$ более удобно и заимствуемое из таблицы значение X' должно быть обратным значению X , т. е. $X' = \sqrt{\gamma_1/\gamma_0}$. В случаях, когда необходимо ежедневно производить подсчет результатов показаний многих измерительных приборов, можно экономить много времени, если учесть такие мелочи. В паромерах с автоматической поправкой на давление влияние последнего уже имеется в значении формулы (9), так что X должно выравнивать лишь влияние температуры. Если механизм для выравнивания отрегулирован так, что насыщенный пар измеряется всегда точно, удельный вес которого пусть будет γ_s , то необходимо X сделать равным $\sqrt{\gamma_s/\gamma_1}$, для чего можно приблизительно допустить $X = \sqrt{T_1/T_s}$. Однако, автоматическая поправка на давление может быть отнесена также к определенной температуре сравнения T_0 , и при применении перегретого пара это целесообразнее; тогда следует ввести $X = \sqrt{T_0/T_1}$.

§ 93. Потери энергии. Измерение пара обуславливает потерю давления, являющейся потерей энергии, если после того в машине производится работа. Потеря давления у поплавковых измерителей была вычислена на стр. 203, и колеблется от 0,05 до 0,15 ат; у дроссельных измерителей потеря давления возрастает от 0 до максимального (для приборов рис. 218—223) значения, равного, примерно, 0,6 ат; у обоих паромеров потеря давления повышается параболически; следовательно, потеря давления равна:

Расход в долях номинального для	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{1}$
У поплавковых измерителей (ат)	0,05	0,075	0,15
У дроссельных измерителей (ат)	0	0,15	0,6

Для приблизительного подсчета потери энергии находим по is -диаграмме, что от 20 ат при 300°C до 2 ат мы располагаем перепадом тепла $\Delta i = 109,8$ ккал; далее измеряем по is -диаграмме, что разность давлений в 0,1 ат, при 2 ат отвечает потере около 2,02 ккал. При измерении пара со стороны противодавления, потеря тепла при $\frac{1}{2}$ расходе равна:

У поплавковых измерителей	0,075 · 2,02 : 0,1 = 1,51 ккал = 1,4%
У дроссельных измерителей	0,15 · 2,02 : 0,1 = 3,02 ккал = 2,8%

При измерении пара высокого давления находим по *is*-диаграмме, что от 18 ат при 298° С (т. е. точки одинакового теплосодержания при 20 ат и 300° С) вниз до 2 ат перепад тепла равен 106,0 ккал. Это будет на 3,8 меньше на каждые 2 ат или меньше на 1,9 ккал на 1 ат потери давления в области высокого давления, так как расширение пара в измерителе происходит при неизменном теплосодержании. Тогда потери будут:

У поплавковых парометров $0,075 \cdot 1,9 = 0,143$ ккал, или 0,13%

У дроссельных парометров $0,15 \cdot 1,9 = 0,286$ ккал, или 0,26%

Только при измерении пара при высоком давлении обесценение пара незначительно. К сожалению, с повышением давления возрастают также и трудности измерения. В этом отношении труба Вентури удобнее.

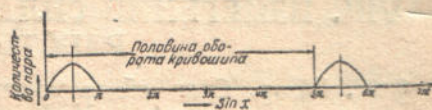


Рис. 229.

§ 94. Особые случаи. Бывают случаи, когда в паропроводе возможно течение пара в обеих направлениях; в таких случаях можно в разветвлении паропровода установить два поплавковых паромера в противоположных по течению направлениях; таким образом, каждый паромер замыкает как обратный клапан проход пара в противоположном ему направлении. Применение дроссельных парометров в таких случаях не рекомендуется, в виду их нечувствительности вблизи нулевой точки. Применялись дроссели (рис. 182), работа которых при более медленных потоках (с небольшим числом *Re*), однако, также ненадежна. Отсчет по показывающим приборам легко производить по обоим направлениям, легче всего по кольцевым весам. Показания паромера вблизи поршневых паровых машин могут быть серьезно искажены. Паромер реагирует на квадрат количества пара, а при колеблющемся его количестве на среднее квадратичное значение, тогда как необходимо измерять простую среднюю величину. Когда паровая машина забирает пар в течение $\frac{1}{5}$ времени хода и количество забираемого пара за это время идет согласно синусоидальному закону (рис. 229), то возможна такая погрешность в показаниях. Предположим, что равномерно протекающее количество пара величиной 1 было правильно указано парометром. Если это же количество, согласно принятому выше закону, проходит через паромер прерывно, то максимальная ордината синусоидальной линии должна быть выбрана так, чтобы площадь под ней давала в качестве простого среднего значения единицу.

Ввиду того, что $\int_0^{\pi} \sin x \cdot dx = 2$ и так как время хода обозначается 5π , то максимальная ордината должна стать равной $\frac{5}{2}\pi$. Квадратичная кривая дает, следовательно, максимальное значение в $\left(\frac{5}{2}\pi\right)^2$ и так как $\int_0^{\pi} \sin^2 x \cdot dx = \frac{1}{2}$, то среднее квадратическое значение на участке 5π равно

$$\sqrt{\frac{\left(\frac{5}{2}\pi\right)^2 \int_0^{\pi} \sin^2 x \cdot dx}{5\pi}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{5}{2}\pi\right)^2 \cdot \frac{\pi}{2}}{5\pi}} = \sqrt{\frac{5}{8} \pi^2} = 2,48.$$

Таким образом поток пара, меняющийся, согласно принятому нами закону, может быть указан преувеличенным в 2,48 раза. На некотором расстоянии от машины и в частности при промежуточном включении парособирателя погрешности эти быстро снижаются, но все же остается обременительным износ пишущего штифта. Если будет теперь предложено упруго соединить поплавок с грузом и со шпинделем, то это будет неправильно; посредством подобных приемов или дросселированием измерительной трубки дроссельного паромера можно уменьшить движения пишущего штифта и получить отчетливую линию, но эта линия сообразно с вышеприведенным оказалась бы неверной (Л.).

— VIII. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ, ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА, РАБОТЫ, МОЩНОСТИ

§ 95. **Обзор.** Сила обнаруживается и измеряется по действию, которое она оказывает на различные тела — например, на части машин и строений.

Сила может быть обнаружена и тем, что она уничтожает движение, возбужденное одной или многими другими силами: тогда она находится в *равновесии* с этими силами. Если другая сила известна, то ее можно использовать, на основании учения о равновесии, для измерения первой силы. Чашечные весы сравнивают какую-нибудь силу с силой тяжести уравнивающих ее разновесок, пружинные весы — с упругими силами пружины, также известными (по градуировке). Если весы приспособлены не для измерения количеств вещества, а специально для измерения силы, то они называются *динамометрами*.

Сила также может служить для того, чтобы поддерживать наличное движение, несмотря на противодействующие сопротивления (установившееся состояние). Она преодолевает тогда сопротивление и производит этим работу, которая выражается как произведение из величины силы P на путь s точки ее приложения: $L = P \cdot s$. Работа, произведенная или потребленная машиной в одну секунду, называется *мощностью* машины. Мощность таким образом представляет произведение силы на путь, отнесенное к одной секунде, или произведение силы на скорость $N = \frac{Ps}{t} = Pv$. Эти отношения могут служить для измерения силы, поскольку из закона сохранения энергии известно, что работа не уничтожима. Она может превращаться в различные другие формы энергии; эти превращения происходят согласно точным эквивалентным отношениям. Поэтому работу можно выражать не только при помощи механических, но и электрических и тепловых единиц и тогда обратно исчислять силу. Такие же эквивалентные отношения при подобных превращениях имеют силу и в отношении мощности, которой также можно пользоваться для определения силы.

Если, предположим, измерена электрическая мощность электромотора подъемного крана и скорость крюка, то из уравнения $P = N/v$ получается вес поднятого груза, конечно, без учета коэффициента полезного действия. Если измерена индикаторная мощность паровоза и скорость поезда, то по аналогичной формуле получается развиваемое на крюке тяговое усилие, опять-таки без учета коэффициента полезного действия; при этом безразлично, шел ли поезд на подъем или с горы. Чаще, наоборот, определяют по грузу и скорости крюка подъемного крана его мощность и из тягового усилия и скорости поезда — мощность паровоза. Взаимоотношения остаются те же.

Если, наконец, речь идет об ускоренном или замедленном движении, то общая сила, действующая на тело, может быть определена из общих уравнений ускоренного движения. Результирующая сила P , действующая на тело с массой m , находится из уравнения ускоренного движения $P = m \frac{d^2s}{dt^2}$ или $P = m \frac{dv}{dt}$. Для ее определения необходимо измерить пройденный путь или соответствующую скорость, в зависимости от времени и затем нужно произвести одно- или двукратное дифференцирование.

При *вращательном движении*, вместо силы рассматривается вращающий момент, представляющий пару сил, величина которого выражается как произведение из силы на плечо: $M_a = Pl$. Если одна из сил пары проходит через

ось вращения, то вращательный момент, развиваемый другой силой, выражается произведением силы на расстояние точки приложения от оси, т. е. опять $M_d = Pl$. Вращающий момент можно также определить как силу, действующую на плечо, равное единице.

Поскольку дело идет о вращательном движении, все сказанное относительно силы и ее измерения может быть отнесено и к вращающему моменту. Только место поступательной скорости занимает угловая скорость ω или число оборотов n , вместо пути выступает угол поворота φ , а вместо массы — момент инерции J .

При вращательном движении дело также может идти о *состоянии равновесия*, когда движение, вызываемое измеряемым вращающим моментом, не осуществляется, вследствие противодействующего ему равного по величине момента, как, например, балка тормозного зажима.

Или дело может идти об установленном состоянии: маховик двигателя, несмотря на противодействующий момент тормозного нажима работающей динамомашины или нагруженной трансмиссии, продолжает равномерно вращаться и производит работу, которая определяется как произведение величины вращающего момента M_d и пройденного угла поворота φ : $L = M_d \varphi$. Произведенная в секунду работа опять представляет мощность машины, согласно уравнения $N = \frac{M_d \dot{\varphi}}{t} = M_d \omega$. Эти уравнения служат для измерения вращающего момента, на основании закона сохранения энергии: когда мы пишем $M_d = N/\omega$, то мощность N можно измерять не только в механической форме, но и как электрическую мощность работающей динамомашины и, измерив, кроме того, угловую скорость посредством тахометра, можно подсчитать необходимый для работы динамомашины вращающий момент. Коэффициент полезного действия здесь опять не принят во внимание.

При *ускоренном* или *замедленном* движении можно найти результирующий момент, действующий на вращающиеся массы с моментом инерции J из уравнения, которое для вращательного движения имеет форму $M_d = J \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ или $M_d = J \frac{d\omega}{dt}$; необходимо определить момент инерции и угол поворота или угловую скорость и опять произвести дифференцирование.

§ 96. Единицы. Как единица силы в технической системе мер килограмм ($кГ$) — одна из основных единиц. Единицей момента вращения будет такой вращающий момент, где один килограмм действует на плечо в 1 м: метрокилограмм ($м \cdot кГ$). Употребляются также и меньшие единицы: $1 \text{ см} \cdot кГ = \frac{1}{100} м \cdot кГ$.

Единицей работы будет такая работа, которую надо затратить, чтобы преодолеть сопротивление в 1 $кГ$ на протяжении 1 м, например, поднять груз в 1 $кГ$ на высоту одного метра. Единица работы поэтому называется килограммометром ($кГ \cdot м$). Если для определения единицы работы воспользоваться вращательным движением, то единицей будет работа, которая получается при повороте на угол, равный единице $\frac{180^\circ}{\pi} = 57^\circ 17,75'$, против сопротивления в виде момента вращения в 1 $м \cdot кГ$. Единицей поэтому будет $1 м \cdot кГ \cdot 1 = кГ \cdot м$, так как угол представляет отвлеченное число. О более употребительных единицах работы будет сказано ниже.

Единица мощности в технической системе мер получается, когда в каждую секунду развивается работа в 1 $кГ \cdot м$. Эта единица $1 \frac{кГ \cdot м}{сек}$ не является употребительной. В моторостроении считают на лошадиные силы, которые определяются как $1 л. с. = 75 \frac{кГ \cdot м}{сек}$.

Кроме того, теперь и при измерении механических величин все больше и больше считают на киловатты, так как эта единица употребляется в электротехнике. Киловатт происходит из *CGS* системы, в которой грамм имеет значение *массы*; по сравнению с технической системой, в которой килограмм пред-

Ставляет силу, всегда в уравнение входит ускорение силы тяжести (стр. 16) или таблица, стр. 409), поэтому получается

$$1 \text{ квт} = \frac{1000}{9,81} = 102 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}}$$

Из сравнения обеих величин следует:

$$1 \text{ л. с.} = 0,736 \text{ квт}; 1 \text{ квт} = 1,36 \text{ л. с.}$$

В качестве единицы работы следует употреблять не килограммометр, а лошадиную силу-час или киловаттчас; такая работа получается, когда в течение одного часа доставляется 1 л. с. или 1 квт; естественно

$$1 \text{ л. с.} \cdot \text{час} = 0,736 \text{ квт} \cdot \text{час}; 1 \text{ квт} \cdot \text{час} = 1,36 \text{ л. с.} \cdot \text{час}.$$

Иногда приходится пользоваться отношениями

$$1 \text{ л. с.} \cdot \text{час} = 75 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{сек} \cdot 3600 \text{ сек} = 270\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

$$1 \text{ квт} \cdot \text{час} = 102 \cdot 3600 = 860 \cdot 427 = 367\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

При вращательном движении $75 \text{ кг} \cdot \text{м}$ развиваются тогда, когда какая-либо машинная часть поворачивается на угол, равный единице (1 радиан = $57^\circ 17,75' = 360^\circ : 2\pi$) при моменте вращения в $75 \text{ кг} \cdot \text{м}$. Так как угловая скорость большей частью задается в форме числа оборотов, то получается $\omega = n/60 \cdot 2 \text{ рад/сек}$ и вращающему моменту M_d соответствует мощность в

$$\frac{2\pi \cdot M_d \cdot n}{60}, \text{ измеренная в } \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} \text{ или } N \text{ л. с.} = \frac{2\pi}{60 \cdot 75} \cdot M_d \cdot n = \\ = \frac{M_d \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot n \cdot \text{мин}^{-1}}{716}; N \text{ квт} = \frac{2\pi}{60 \cdot 102} \cdot M_d n = \frac{M_d \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot n \cdot \text{мин}^{-1}}{973}.$$

В английской системе мер единицей работы является фунтофут; $1 \text{ кг} \cdot \text{м} = 7,233 \text{ фунтофута}$. Английская лошадиная сила НР = $550 \frac{\text{фунтофут}}{\text{сек}}$; $1 \text{ л. с.} = 0,986 \text{ НР}$.

§ 97. Динамометры для измерения сил¹ Динамометр или силомер, согласно буквальному значению этого слова по-гречески, можно определить как прибор для прямого измерения сил. Тогда каждые весы также представляют динамометр, как прибор, измеряющий силу тяжести.

Однако приборы, предназначенные для взвешивания тел с целью определения их массы, как меры количества вещества, принято называть не динамометрами, а весами.

С другой стороны, и типичные весы иногда употребляются в качестве настоящего динамометра, как например, десятичные весы при тормозных испытаниях для определения мощности двигателей (§ 98).

Целый класс приборов, предназначенных для измерения разрывных усилий, также не называются динамометрами, а разрывными машинами, так как собственно динамометр является только составной частью этих, иногда довольно сложных, машин для испытания материалов. Впрочем приборы для испытания текстильных материалов, например, типа Шоппера² иногда называются разрывными динамометрами.

Таким образом, динамометр приходится определить как прибор для измерения сил (за исключением силы тяжести), могущих действовать в любых направлениях.

Поскольку сила является *одной* из трех *основных единиц* технической системы мер, точное измерение сил имеет важное значение.

Для измерения сил можно использовать силу тяжести, силу упругости и некоторые другие физические явления, например, пьезоэлектрический эффект или изменение магнитной проницаемости под влиянием растяжения.

Сила тяжести может быть использована в качестве эталона только в стационарных установках, как например, в разрывных машинах, где она действительно широко используется, но для собственно динамометров пользование ею почти исключается, так как при отсчете требуется точная установка по уровню.

¹ Параграф 97 написан переводчиком.

² В СССР изготавливаются цехом точных приборов завода «Красный Треугольник» в Ленинграде.

Пьезоэлектрический эффект используется редко и в специальных случаях (Л. и след.).

Таким образом, остается только использование сил упругости, и действительно, почти во всех без исключения собственно динамометрах для измерения сил используется упругость твердого тела, т. е. пружины в наиболее общем значении этого слова.

Гидравлические динамометры всех типов также не составляют исключения и в конечном счете даже в манометре измерительным органом является трубчатая или дисковая пружина.

Поэтому поведение всякого динамометра прежде всего определяется поведением его пружины.

В § 6, в качестве источников ошибок у пружин, упоминалось упругое последствие и упругий гистерезис.

Упругое последствие выражается в том, что пружина при изменении нагрузки приходит в новое положение равновесия не сразу, а постепенно. У закаленных пружин из хороших сортов пружинной стали упругое последствие фактически незаметно и может вовсе не приниматься в расчет.

Гистерезис характеризуется тем, что, благодаря своего рода внутреннему трению, пружина при убывающей нагрузке не доходит до того положения, которое она занимала при возрастающей нагрузке, при том же самом грузе. На диаграмме это выражается замкнутой площадью гистерезисной петли, выражающей потерю энергии за один цикл, переходящую в тепло. При неправильной термической обработке пружины этот недостаток может достигать заметной величины и влиять на качество динамометра.

На пружины из обычно применяемых сортов стали оказывает влияние температура. При повышении температуры пружина делается мягче; при повышении на 25° динамометр показывает, приблизительно, на 1% больше своей градуировки и наоборот ¹.

Самое же неприятное свойство пружин то, что со временем они меняют свою упругость и тем больше, чем больше пружина работает. Причины, обуславливающие постоянство пружины, мало изучены и заранее трудно сказать, как долго данная пружина будет сохранять свои показания. Поэтому, если от динамометра требуется особая точность, необходимо возможно часто производить его поверку, хотя бы проверкой максимальной или половинной нагрузки.

Такая поверка, весьма простая при умеренных мощностях, при больших становится, без специальных устройств, затруднительной.

В Германии не установлена обязательная официальная поверка динамометров и их клеймение. В СССР такая поверка установлена недавно ².

Согласно § 8, раздела Б этих правил,

«... пригодными к применению признаются те динамометры, поправки к показаниям которых не превышают $\pm 2\%$ каждого из значений шкалы при прямом и обратном ходе и при условии соблюдения прибором постоянства показаний».

Пункт «б» этого параграфа для динамометров, служащих для работ, не требующих большой точности, допускает погрешность $\pm 4\%$.

Эти требования не распространяются на нижнюю пятую часть шкалы, причем в этом случае деления, кроме нуля, на этой части шкалы не наносятся и эта часть считается не рабочей.

Может показаться, что это достаточно мягкие требования.

Однако, следует иметь в виду, что испытание динамометров по правилам производится *возможной* нагрузкой (примечание к пункту «г», § 3, раздел Б), тогда как при практическом применении динамометров такие условия плавной нагрузки могут встретиться лишь как редчайшее исключение. Почти всегда

¹ Пружины из специального железо-никелевого сплава, так называемого «элинвара» практически не изменяют своей упругой постоянной с изменением температуры, но применяются пока в специальных случаях и в обычных динамометрах пока не используются.

² ВКС Центральное Управление мер и весов, № 81, «Инструкция для поверки рабочих пружинных динамометров». Стандартгиз, Москва—Ленинград, 1935 г., цена 20 коп.

при измерении нагрузка бывает колеблющейся или динамометр подвергается толчкам и сотрясениям, иногда довольно резким.

Между тем, такие сотрясения вызывают мгновенные ослабления сил трения, что позволяет трущимся частям приблизиться к положению равновесия и тем значительно повышают точность отсчета.

Если бы и на практике встретился такой случай плавной нагрузки, то точность отсчета можно повысить постукиванием деревянным предметом по силовой части динамометра, где можно ожидать трения (направляющие, втулка крюка).

Поэтому и динамометром с официальной погрешностью до 4% можно, при внимательном и умелом обращении, производить измерения с точностью лучшей, чем 2%.

С другой стороны, в большом числе случаев практики (например, натяжка проводов электролиний) и точность в $\pm 4\%$ вполне достаточна.

Всякий, соприкасавшийся с изготовлением динамометров, знает, как трудно при массовом производстве пружинных динамометров добиться точности $\pm 2\%$ и насколько при этом повышается их стоимость, хотя в испытываемой партии попадают при этом отдельные динамометры, дающие погрешность и менее $\pm 1\%$.

Некоторые динамометры имеют циферблат, который можно немного поворачивать для приведения указателя к нулю, если стрелка почему-либо немного сойдет с нуля.

Согласно § 11 раздела А, такие динамометры должны иметь приспособление для закрепления этих шкал после проверки.

Между тем, если пружина после денной работы даже получит некоторую осадку, конечно, небольшую, то после приведения стрелки опять к нулю, динамометр большей частью полностью сохраняет свою градуировку.

В некоторых конструкциях динамометров приведение стрелки к нулю конечно, в узких пределах, может производиться при помощи специального винта снаружи и при запломбированном циферблате; это следует считать большим преимуществом таких конструкций.

При конструировании динамометра необходимо обращать самое серьезное внимание на влияние трения. На все основные части динамометра измеряемая сила действует своей полной величиной и вполне понятно, что при неправильной конструкции она может вызвать весьма большие силы трения и причинить недопустимые ошибки.

Лучшей иллюстрацией может служить конструкция динамометра германской фирмы П. Поликейт (рис. 232а). Эти динамометры, к сожалению, ввозились и в СССР и работают и по сей день.

Шарнирный многоугольник, в который заключена измерительная коническая пружина, подвержен полному измеряемому усилию и при всяком изменении нагрузки все его шарниры поворачиваются на один и тот же угол, производя работу против сил трения. Какой величины могут достигать эти силы, можно видеть из следующей теории простого рычажного динамометра на таких шарнирах ¹.

На шарнир А рычага действует измеряемая сила P , на длинное плечо L рычага действует сила p пружины, радиусы шарниров r_0 и r_2 .

При возрастании нагрузки рычаг поворачивается на шарнире на некоторый малый угол α , на тот же угол поворачивается другой грузовой шарнир или вокруг него поворачивается серьга крюка. Возникающие силы трения равны силам P и R , умноженным на коэффициент трения φ . Равнодействующую R принимаем равную P , т. е. делаем допущение в пользу конструкции.

При возрастающей нагрузке движущей силой является эта нагрузка и ее работа должна равняться работе всех сопротивлений, т. е. работе сжатия пружины и работе сил трения в шарнирах.

Уравнение работы будет

$$Pla = p_1La + \varphi Pr_0\alpha + \varphi Pra$$

¹ Теория эта была дана пишущим эти строки в 1932 году и появляется в печати впервые.

При убывающей нагрузке действующей силой будет уже давление пружины и уравнение работ будет

$$p_2 L \alpha = Pl \alpha + \varphi Pr \alpha + \varphi P r_0 \alpha,$$

отсюда

$$p_1 L = Pl - \varphi P (r + r_0), \quad (1)$$

$$p_2 L = Pl + \varphi P (r + r_0), \quad (2)$$

уравнение статического равновесия рычага

$$pL = Pl \quad (3)$$

вычитаем (1) из (2)

$$L(p_2 - p_1) = 2\varphi P(r_0 + r),$$

деля на (3), получаем выражение полной относительной ошибки

$$\frac{p_2 - p_1}{p} = 2\varphi \frac{r_0 + r}{l}.$$

Отклонение от среднего истинного положения в ту и другую сторону будет, очевидно, равно половине этой величины, т. е.

$$\pm \varphi \frac{r_0 + r}{l}.$$

Из этой формулы видно, что ошибка зависит от отношения сумм радиусов работающих шарниров к короткому плечу рычага.

У фактически изготовлявшихся таких динамометров на 5 т это отношение $\frac{r_0 + r}{l}$ оказалось равным 0,45. Принимая для коэффициента трения минимальное значение $\varphi = 0,1$, что очень мало, ввиду больших удельных давлений и приближения характера трения к трению покоя, получаем ошибку, вызываемую *только одним трением* в шарнирах в $\pm 0,1 \cdot 0,45 = 0,045$ или $\pm 4,5\%$.

В упомянутой же конструкции Поликейта имеется не два, а шесть работающих шарниров и ошибка будет, конечно, еще больше.

Аналогичный расчет дает для него минимальную ошибку до $\pm 12\%$.

Из сказанного ясно, что конструкции динамометров с такими работающими на трение шарнирами совершенно недопустимы.

Сказанное не относится к упругим серьям любого динамометра, так как их шарниры при изменениях нагрузки только растягиваются, не вращаясь, а, следовательно, не дают никакой работы трения.

В виду такого большого влияния трения в силовой части динамометра, необходимо возможно тщательно оберегать трущиеся части от ржавчины, а, следовательно, и от сырости, и конструкция динамометра должна быть доступной для соответствующего осмотра и чистки.

По конструкции динамометры можно разделить на собственно пружинные и на гидравлические.

Цилиндрические динамометры могут быть как натяжные (рис. 231), так и нажимные (рис. 232).

Натяжные, самые распространенные динамометры, служат для измерения растягивающих усилий, для приложения которых снабжаются крюками, серьями или ушками.

Нажимные динамометры для измерения усилий, действующих нажимом, применяются значительно реже, например, при тормозном нажиме Прони.

Они обыкновенно снабжаются широкой подставкой или опорой, а сверху нажимной головкой, иногда сменной, различной формы, в зависимости от назначения.

Натяжные могут иметь пружину, работающую или на сжатие (рис. 231), или на растяжение (рис. 233). Деформация пружины, служащая мерой действующей

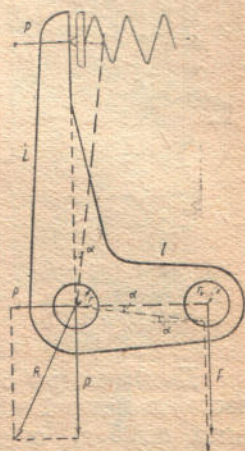


Рис. 230. Схема к теории рычажного динамометра.

щего усилия, обыкновенно при помощи зубчатой гребенки и шестеренки передается стрелке, вращающейся на оси перед круглым циферблатом, разделенным на килограммы.

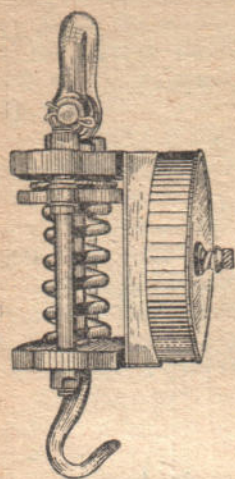


Рис. 231. Натяжной динамометр, изгот. ВУТРИЗ.

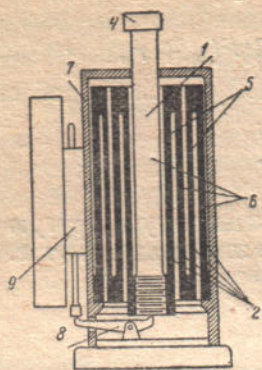


Рис. 232. Схема нажимного динамометра

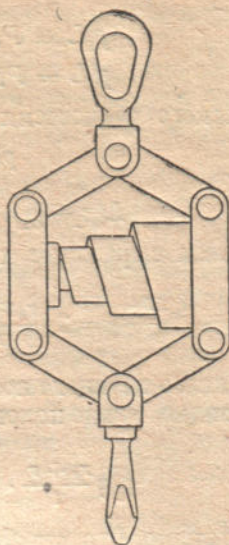


Рис. 232а. Шарнирный динамометр П. Поликейта.

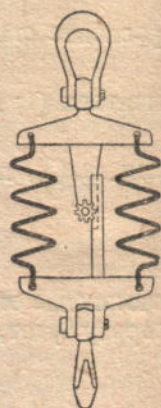


Рис. 233. Динамометр с пружиной, работающей на растяжение.

Динамометры с пружиной, работающей на растяжение, не имеют трущихся частей в силовой части и потому должны бы быть свободны от вызываемых трением ошибок, однако, вследствие затруднительности сконструировать удобную и точную передачу к указывающей части, не имеют большого распространения.

В отношении такой передачи удобнее конструкции динамометров с пружиной, работающей на сжатие, имеющие наибольшее распространение. Теоретически, при центральном действии сил эти динамометры также не должны давать ошибки на трение, но практически поршень или направляющие все же вызывают небольшое трение, хотя, ввиду параллельности направления движения с направлением действующих сил, трение это незначительно и хорошие динамометры этого типа иногда дают ошибку, не превышающую $\pm 1\%$.



Рис. 234. Натяжной динамометр с эллиптической пружиной «Шеффер и Буденберг».

Вообще до 1 т эти динамометры следует считать удовлетворительными во всех отношениях: они удобны, компактны, достаточно точны и имеют вполне равномерную шкалу, что имеет значение для регистрирующих динамометров, диаграммы которых затем планиметрируются.

При больших мощностях, до 5 т, они делаются более громоздкими и им следует предпочитать эллиптические.

Цилиндрические динамометры для измерения сил больших пяти тонн употреблять не следует, они уже слишком громоздки и трудно изготовлять пружины, обеспечивающие хорошую точность.

Иногда делают динамометры с конической спиральной пружиной, вроде буферной вагонной пружины, из широкой плоской стали. Благодаря высокому узкому сечению такой стали, можно изготовлять пружины по 15 т еще не очень громоздкими.

Изготовление цилиндрических динамометров уже освоено в СССР.

Эллиптические динамометры имеют пружину продолговатой, овальной или рыбовидной формы. Такая пружина или составляется из двух, соответственно

изогнутых, полос рессорной стали (рис. 234) при больших мощностях, или бывает цельной при малых мощностях.

При растяжении пружина удлиняется в продольном направлении и сжимается в поперечном. Та или другая деформация зубчатым сектором и шестеренкой передается стрелке, движущейся по разделенному на килограммы круглому циферблату. Как и в цилиндрических динамометрах, на ось стрелки действует специальная противолофтовая пружина, всегда прижимающая шестеренку навстречу зубчатому сектору или гребенке и тем устраняющая мертвый ход при перемене нагрузки.

Как легко видеть из рис. 234, в силовой части динамометра нет никаких трущихся частей, а потому нет и потерь на трение и вызываемых трением ошибок.

Поэтому при таких динамометрах достижима высокая точность и эллиптические динамометры некоторыми фирмами изготавливаются как зарекомендовавшие себя эталоны для выверки разных машин.

Будучи одним из самых старых типов, известных не менее 40 лет, эллиптические динамометры широко распространены и, например, в США являются преобладающим типом.

Эллиптические динамометры изготавливаются на любые мощности до 20 и даже 50 т. Однако, динамометры обычного типа при больших мощностях становятся громоздкими по габаритам (в длину). Поэтому в последнее время динамометры большой мощности стали делать цельными, коваными, уменьшив габариты за счет жесткости пружины и довольствуясь малыми деформациями, ставя индикаторы прецизионного типа, заполняющие всю круговую шкалу при деформациях порядка 1 мм. Такие динамометры делаются и нажимными, например, Вацау.

Иногда такие динамометры получают форму массивного круглого кольца (Тиниус Ольсен) и, в зависимости от чувствительности индикатора, могут применять до 100 т при умеренном весе.

Шкала эллиптических динамометров теоретически является сужающейся, что однако практически мало заметно, благодаря относительно небольшим используемым деформациям, что позволяет пользоваться эллиптическими динамометрами и как регистрирующими.

В стержневых динамометрах в качестве пружины используется прямой стержень, сплошной или полый. Теоретически такая форма весьма совершенна, так как материал растягиваемого стержня напрягается по всему объему вполне равномерно, что должно обеспечивать постоянство показаний и вполне равномерную шкалу, а следовательно и широкую возможность экстраполяции. Однако, для получения больших деформаций пришлось бы придавать стержню чрезмерную длину, хотя и при умеренном весе. Поэтому также предпочитают ограничиваться небольшими деформациями, ставя прецизионные индикаторы (рис. 235). Попытки использовать гидравлические индикаторы пока успеха не имели.

Стержневые динамометры употребляются исключительно для больших мощностей, главным образом, как эталоны для проверки разрывных машин, хотя при некоторых конструктивных улучшениях могли бы оказаться ценными и для средних мощностей.

Гидравлические динамометры бывают двух типов, — поршневые и мембранные, называемые иногда также месдозами.

В поршневом динамометре измеряемая сила, действуя на поршень, точно пришлифованный к своему цилиндру, сжимает заполняющую его жидкость, обыкновенно масло, до высокого давления, которое или измеряется каким-либо манометром (в показывающих приборах) (рис. 236) или, действуя на поршень значительно меньших размеров, сжимает небольшую измерительную пружину и приводит в движение записывающий штифт регистрирующего механизма (рис. 237).



Рис. 235. Стержневой динамометр Тиниус Ольсен.

Так как соединительная трубка может быть значительной длины, то указывающий или регистрирующий механизм может быть перенесен в более удобное место. Это имеет огромное значение, например, при изучении работы тракторных плугов.

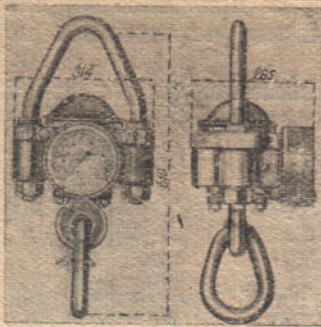


Рис. 236. Гидравлический поршневой указывающий динамометр «Шеффер и Буденберг».

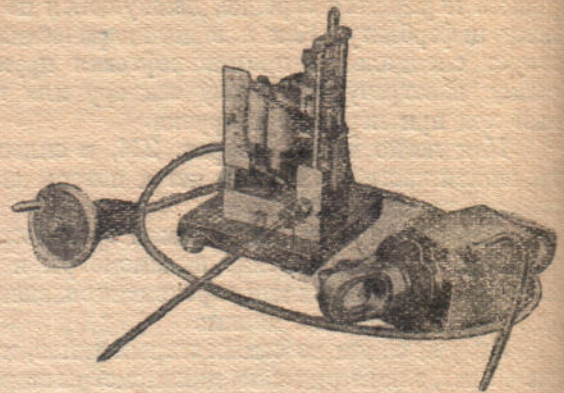


Рис. 237. Гидравлический поршневой регистрирующий динамометр Амслер.

Такие гидравлические динамометры, в качестве регистрирующих, имеют большие достоинства. Они имеют совершенно равномерную шкалу, что имеет значение при планиметрировании диаграммы. Затем они, благодаря сравнительно большому объему жидкости под поршнем, совершенно нечувствительны к присутствию воздушных пузырьков, полное удаление которых столь затруднительно особенно в мембранных динамометрах; нечувствительны они и к утечкам масла

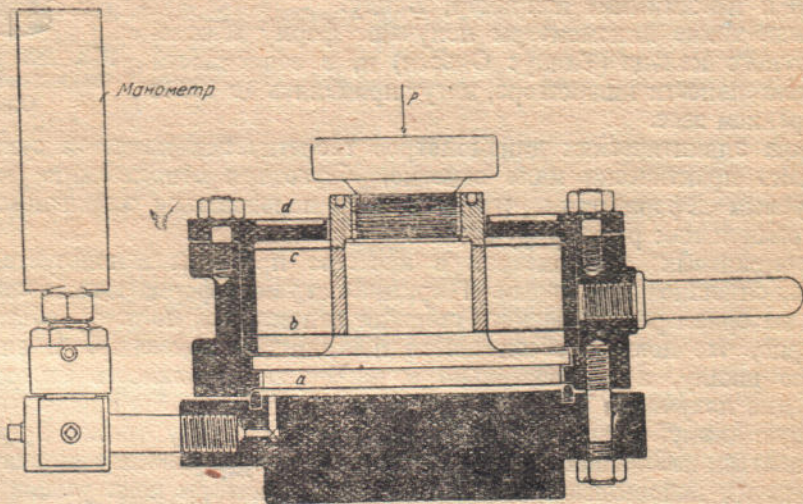


Рис. 238. Гидравлический мембранный динамометр (мессдоза) машиностроительной фабрики Аугсбургско-Нюрнбергского О-ва, мощность 20000 кг, $\frac{1}{4}$ натур. величины.

через неплотности. При хорошей пришлифовке и центрировке поршня, обеспечивающей от грубых перекосов и заеданий, влияние трения сведено к минимуму и динамометры отличаются весьма хорошей точностью. Это не относится к некоторым конструкциям указывающих динамометров с уплотнением кожными манжетами; ¹ таких конструкций следует избегать.

Наконец, наиболее ценным свойством самопишущего поршневого динамометра является возможность сглаживания толчкообразных колебаний, нередко весьма искажающих диаграмму и весьма затрудняющих ее обработку.

¹ Например, фирмы «Шеффер и Буденберг». Каталог 26 г. Таблица 34, стр. 9 «Kran-Wage».

Этот недостаток особенно чувствителен при чисто пружинных динамометрах, при таких работах как исследование работы трактора. Сильная, с большим ходом, пружина динамометра с жестко связанным с ней плугом или другим орудием, под влиянием толчков, начинает совершать совместные упругие колебания большой амплитуды, совершенно исчерчивая всю диаграмму поперечными частыми зигзагами; для планиметрирования такой диаграммы приходится предварительно на глаз проводить среднюю линию поперек зигзагов.

В гидравлических динамометрах эти колебания весьма удобно демпфировать, просто прикрывая более или менее кран на трубке, соединяющей силовой цилиндр с регистрирующим. При этом можно полностью заглушить случайные быстрые вибрации, тогда как ход изменений сопротивления плуга передается с полной отчетливостью и без искажений¹.

Диаграммная лента получает движение от колеса плуга или трактора. Такая подача, пропорциональная пройденному пути, весьма удобна, так как площадь диаграммы в этих случаях прямо дает работу трактора в килограммометрах без всяких пересчетов. В других самопишущих динамометрах такая подача, пропорциональна пройденному пути, — осуществляется при помощи шнурка одним концом намотанного на барабан в корпусе динамометра, а другим укрепляется снаружи. Шнурок, сматываясь с барабана во время хода трактора, приводит в движение ленту. Такой способ менее удобен. Слабым местом гидравлического динамометра является соединительная гибкая трубка между цилиндром и регистрирующим механизмом. Эта трубка обыкновенно делается из красной меди и от вибраций и перегибов довольно часто ломается и тогда должна быть заменена запасной. Пока не найдено другой неломающейся трубки².

Другой тип гидравлического динамометра представляет мембранный динамометр или, как его иногда называют, мессдоза. Такой динамометр изображен на рис. 238.

Жидкость заполняет пространство, закрытое сверху кружком из тонкой латунной, нейзильберной или стальной жести, лежащей краями на уплотняющем кольце и плотно зажатой между ним и верхней частью корпуса. Давление, возникающее в жидкости, определяется манометром. На мембрану опирается поршень, который только немного меньше кольцевой поверхности, по которой зажата мембрана. Для деформации мембраны при передвижении поршня остается только узкая кольцевая щель — недостаточная, чтобы мембрана имела некоторую игру и допускала возрастание давления жидкости. Направление движения поршня достигается двумя пружинящими кольцами из стальной жести *b* и *c*, зажатыми снаружи в корпусе, а внутри между частями поршня. Передвижения поршня весьма незначительны и упругость этих направляющих пружин не имеет заметного влияния на измерение. Столь же незначительны и изменения внутреннего объема пружины манометра; при больших размерах поршня, достаточно его передвижения на доли миллиметра для изменения силы от нуля до предельного значения. Ограничивающие ход упоры редко оставляют более одного миллиметра свободного хода, которого оказывается достаточно, если пространство заполнено надлежащим количеством жидкости и *тщательно удалены все воздушные пузырьки*, которые иначе вызывают большие изменения объема³. Ограничитель хода и крышка от пыли *d* предотвращают повреждение направляющих пружин от неосторожного обращения. При малом диаметре поршня необходимы большие его перемещения для заполнения манометрической пружины, причем и направляющие пружины становятся менее гибкими. Таким образом, уменьшение поршня создает невыгодные условия; кроме того, манометры для больших давлений вообще более надежны чем для малых. Поэтому мембранные динамометры, главным образом, подходят для измерения больших сил; изображенный мембранный динамометр, при диаметре поршня около 160 мм, позволяет измерять силы до 20 000 кг, причем в жидкости возникают давления до 100 ат. Ошибка от неопределенности величины поршня, которую

¹ Этот тип динамометра Амслера освоен в СССР и изготавливается мастерами Института социального земледелия, Ленинград, ул. Халтурина 5.

² Далее продолжается текст Грамберга.

³ И конечно влияют на градуировку.

следует принимать в расчет (так как ширина кольцевой щели входит в расчет лишь частично), делается при возрастании диаметра поршня все незначительнее. Во всяком случае такая неопределенность исключается градуировкой динамометра и тогда теряет значение. Мембранные динамометры зарекомендовали себя, главным образом, при испытании материалов — точностью измерений, нечувствительностью к сотрясениям и удобством пользования (Л.).

Как видно из рис. 238, такой мембранный динамометр приспособлен для измерения нажимных усилий; чтобы приспособить его для измерения растягивающих усилий, необходимо применять хомуты и серьги, увеличивающие его громоздкость. В противоположность поршневым динамометрам, мембранные весьма чувствительны к воздушным пузырькам и к утечкам через неплотности в соединениях. (Прим. перев.).

В настоящее время прилагают много стараний к разработке динамометров с высоким собственным числом колебаний. Потребность в таких динамометрах возникла в связи с исследованиями усилий резания стальными резцами; при таких исследованиях необходимо также, чтобы динамометр при измерении производил только весьма малые перемещения, иначе рабочие условия реза будут изменены, тогда как принципиально он должен быть закреплен вполне жестко.

Требования жесткости совпадают в известном смысле с требованием высокой собственной частоты.

Для достижения высокой собственной частоты могут быть использованы изменения вещества под действием давления. Под влиянием давления угольные сопротивления изменяют свою проводимость, как это имеет место в микрофоне; на этом принципе можно построить динамометр, который, подобно индикатору, можно ввинтить на место свечи в автотор (Л.). Кристалл кварца имеет электрическую ось, расположенную перпендикулярно к оптической, двояко преломляющей оси, причем давление на одну из них возбуждает электрические напряжения на концах другой (Л.) Чтобы построить измеритель ускорения

вращения с собственной частотой в 1000 герц, применяют в качестве датчика такой цилиндр с осью, параллельной электрической оси. Сравните с этим конструкции индикаторов высокой собственной частоты.

Здесь нельзя не упомянуть об оригинальном способе измерения сил, в свое время предложенном русским ученым, проф. Гагариным.

Если мы возьмем цилиндр или шарик из красной меди, мягкого железа или даже просто свинцовую пулю и начнем их сжимать на прессе с диаграммным прибором, то такая диаграмма деформаций в функции действующих давлений изобразится, как известно, наклонной прямой, пока не будет достигнут предел упругости.

По переходе предела упругости образец начнет сплющиваться, а на диаграмме прямая резко изогнется (рис. 238 а, точка а).

Если прекратить сжатие в точке *b* и начать разгружать образец, то разгрузка выразится на диаграмме прямой, наклонной линией *bc*.

Если такой обжатый образец, в любое время и в любом месте, опять поставить на такой же пресс, например, на известный пресс Гагарина¹ и подвергнуть сжатию, то он сперва даст диаграмму в виде наклонной прямой *cb*, т. е. будет сжиматься упруго, но как только будет достигнуто то максимальное давление, которому он был однажды подвергнут, то на диаграмме в точке *b* появится резкий перелом, и образец опять начнет сплющиваться.

По диаграмме легко определить давление, при котором получился перелом, а следовательно и то усилие, которому когда-то был подвергнут образец.

Легко видеть все значение, которое может иногда иметь такой способ. Такой цилиндр или шарик можно поместить в таком ограниченном пространстве, которое недоступно никакому динамометру. Затем такой обжатый образец пересылается в лабораторию, где имеется пресс, и там по диаграмме определяют с хорошей точностью то усилие, которому был подвергнут образец.

Этот способ действительно применяется для определения давлений в каналах орудий, для чего он впервые и был предложен. (Прим. перев.).

Рис. 239 изображает конденсаторный динамометр, который указывает ничтожные прогибы нажимной плитки, при изменении емкости, относительно расположенной напротив нее другой изолированной пластинки; для определения изменений емкостей приходится обращаться к измерениям высокой

¹ У нас изготавливается Мытищенским заводом.

частоты. Значение энергии можно измерить по методу половинной кривой резонанса, в виде постоянного тока (Л.). Можно также пропускать переменный электрический ток через водный раствор азотнокислого свинца. Сопротивление раствора меняется, когда динамометрическая нажимная пластинка нажимает на резиновую мембрану, замыкающую раствор (Л.).

Для того, чтобы подобные динамометры можно было применить для исследования работы (потребляемой *сельско-хозяйственными* машинами, вроде плугов и других орудий), которая значительно изменяется в зависимости от характера и степени влажности почвы, динамометры приходится заключать в соответственным образом приспособленные корпуса.

О применении гидравлических динамометров для исследования работы сельско-хозяйственных орудий уже говорилось. Так как работа, потребляемая различными сельско-хозяйственными машинами сильно меняется, достигая у трактора ЧТЗ нескольких тонн, а работать при неполной нагрузке динамометра невыгодно, то описанный гидравлический регистрирующий динамометр снабжен сменными пружинами, простой переменной, которых на малом поршне можно в широких пределах изменять область измерения, работая всегда в наиболее выгодных условиях, т. е. в верхней половине шкалы, где относительная точность значительно выше. При обширных научно-исследовательских работах с сельско-хозяйственными орудиями бывает целесообразно включать специально сконструированную тележку между исследуемой машиной и трактором, в которой устанавливается динамометр и другие приборы, и может быть место и для наблюдателя.

При исследовании буксирной тяги баржей нередко конец буксирного каната просто присоединяют к динамометру на буксирном пароходе и считают его показание за развиваемую им силу тяги, а планиметрируя затем полученную диаграмму, также принимают ее площадь за меру затраченной работы.

Легко видеть, что натяжение каната, измеряемое динамометром, *всегда больше* развиваемой буксиром тяги, так как представляет равнодействующую этой тяги, действующей горизонтально, и веса буксирного каната. Чем больше провес каната, тем больше разница.

Чтобы не учитывать постоянно меняющегося угла наклона каната, динамометр можно включить в горизонтальную часть каната, т. е. при равной высоте крепления концов каната на буксире и на барже, как раз посередине. Динамометр можно заключить в водонепроницаемый чехол и поставить на динамометр электрический передатчик на расстояние, а повторитель может находиться в канате.

То же решение будет наилучшим и для простого указывающего динамометра для трактора; повторитель может быть поставлен перед глазами тракториста или где угодно.

Имеются весьма простые передатчики с повторителями для постоянного тока, например А. П. Соколовского. При этом получается попутно еще та выгода, что колебание стрелки будет сильно демпфировано.

Для испытания паровозов применяются специальных типов динамометры почти исключительно гидравлические, устанавливаемые в специальных динамометрических вагонах, за упряжным крюком вагона. (Прим. перев.).

§ 98. Тормозной динамометр. Тормозные динамометры измеряют развиваемый силовой машиной вращательный момент, уничтожая соответствующую ему энергию, преимущественно путем превращения ее в тепловую энергию. Они имеют *двойную задачу*: во-первых, загрузить машину, развивая противодействующий ее ходу вращательный момент и уничтожая соответствующую ему энергию, во-вторых измерить этот вращательный момент. *Противодействующий вращательный момент* обычно создается путем механического трения твердых тел, тормозных колодок или тормозных лент о тормозной шкив; место трения может занять гидравлическое сопротивление жидкостей или сопротивление, вызванное вихревыми токами либо реакцией работающих от двигателя машин. Для измерения *вращательного момента* нужно определить силу, которую он вызывает на определенном расстоянии от оси вращения и которая преимущественно определяется уравновешиванием ее разновесками, очень часто применением весов, реже применением пружинного или гидравлического динамометра. Для подсчета мощности машины необходимо, кроме вращающего момента, определить и число ее оборотов.

Простейшая форма тормозного динамометра — известный *нажим Пронци* (рис. 240 и 241). Трение по окружности ременного шкива или маховика возбуждается нажимом на них, с одной стороны, связанной с рычагом колодки,

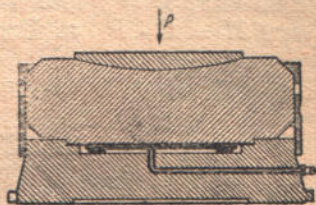


Рис. 239. Мессдоза конденсаторного типа, мощностью 500 т, собственное число колебаний 1000 гц, емкость около 50 см, для измерения давления валцов в прокатных станах.

Часто деревянной, с другой — охватывающей шкив железной ленты, с деревянной обкладкой или без нее, которые прижимаются друг к другу и к шкиву подвинчиванием барашков. Таким путем на окружности шкива *возбуждается* трение, чем и нагружается машина. Величина этой нагрузки *измеряется* установлением при помощи десятичных весов той силы, которую развивает рычаг на своем конце (рис. 232) или непосредственно подвешиванием на конец рычага грузов, пока зажим не придет в равновесие и не будет свободно колебаться между двумя упорными штифтами (рис. 241). Если при таком равновесии рычага измерить на его плече l силу P кг, то машина будет нагружена моментом $M_d = Pl$ кг·м и при числе оборотов n /мин мощность машины будет
$$N = \frac{Md \cdot n}{973} = \frac{l \cdot P \cdot n}{973} \text{ квт.}$$
 Величина $\frac{l}{973}$ для одного и того же нажима, с которым производится ряд тормозных испытаний, будет постоянно одинаковой. Она называется *тормозной постоянной* $C = l/973$. По отношению к лошадиной силе $C = 1/716$. Таким образом, для единичного тормозного испытания будет $N = C \cdot P \cdot n$. Если сделать $l = 973$, то $C = 0,001$.

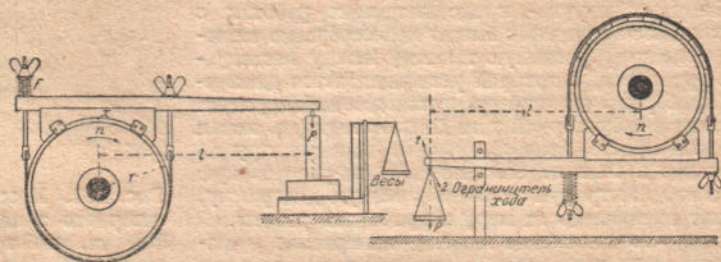


Рис. 240 и 241. Две формы нажима Прони.

Это уравнение можно вывести непосредственно. По окружности заторможенного ременного шкива действуют по касательным силы трения, которые мы сводим к одному окружному усилию F . Сила F действует на тормоз в направлении вращения вала, а на шкив — в обратном направлении. Точка приложения этой силы F есть окружность шкива, и эта точка проходит в секунду путь

$2\pi r \frac{n}{60}$ м. Отсюда получается мощность
$$N = \frac{F \cdot 2\pi r \frac{n}{60}}{102}.$$
 Здесь F и r неизвестны, но $Fr = Pl$ является условием равновесия тормозного нажима. Отсюда получается
$$N = \frac{Pl \cdot 2\pi n}{60 \cdot 102} = C \cdot P \cdot n \text{ квт,}$$
 где $C = \frac{2\pi l}{60 \cdot 102}$ представляет ту же тормозную постоянную, как и раньше, т. е. $\frac{l}{973}$.

В P не должен входить собственный момент тормозного рычага. Поэтому перед началом испытания совершенно отпускают винты, подкладывают в точке x между шкивом и нажимом, призматическую опору, хотя бы трехгранный напилек, и когда таким образом трение устранено и нажим оказывается свободно подвешенным, тарируют весы, как на рис. 240. Полученный вес впоследствии вычитается из P . Или вместо этого просто уравнивают рычаг соответствующим противовесом слева.

Чтобы добиться устойчивого равновесия, необходимы два условия: некоторая эластичность натяжного устройства и подходящие статические соотношения всего тормозящего устройства. Поскольку тормозная лента и работающий на изгиб рычаг недостаточно гибки, эта эластичность должна быть достигнута специальными пружинами, которые на рис. 240 и 241 представлены в виде винтовых пружин, работающих на сжатие. Без таких пружин натяжение тормозной ленты резко усиливается или ослабляется уже при небольшом повороте натяжной гайки; пружины же допускают лишь постепенное возрастание натяжения ленты, по мере своего собственного сжатия; только при наличии пружин можно с надлежащей точностью и уверенностью установить желаемый вращающий

момент. Пружины должны иметь подходящую упругость, именно при наибольшем натяжении они должны быть *достаточно* сжаты, но без посадки витка на виток, когда упругость пружины больше не появляется. Так как, однако, многие построенные тормозные нажимы удовлетворительно работают и без таких пружин, то кажется, что собственная упругость тормозной ленты и ее деревянной обкладки в большинстве случаев сама по себе является достаточной, чтобы поддерживать раз установленную нагрузку. Однако, в таких случаях необходима возможность тонкой установки натяжных гаек, каковая достигается, например, на рис. 248 посредством червячной передачи.

Что касается *статических соотношений* тормозного устройства, то последнее при рабочей установке должно находиться в устойчивом равновесии. На рис. 240 центр тяжести тормозного нажима, конечно, выше середины вала, так что, если рычаг и сбалансирован, он все же находится в неустойчивом равновесии: при малейшем отклонении от среднего положения он стремится опрокинуться. Но так как десятичные весы статически весьма устойчивы, то они улучшают устойчивость так, как будто плечо рычага увеличивается, когда тормоз увлекается вперед, и уменьшается, когда он отходит назад. Это способствует тому, что в общем все устройство делается устойчивым; оно было бы неустойчивым, если бы верхняя балка была тяжелой, а весы маленькими. При применении непосредственно грузов, тормоз был бы устойчивым лишь при расположении балки внизу, при том по возможности так, чтобы при обратном передвижении плечо рычага уменьшалось. При балке, расположенной сверху, тормоз не будет устойчивым и в том случае, если рычаг изогнут так, что груз может быть подвешен на высоте вала, а также и тогда, если посредством сегмента, как на рис. 244, предотвратить, по крайней мере, уменьшение плеча рычага при обратном движении тормоза. Впрочем, изменчивость измеряющего плеча рычага по рис. 241 согласно стрелок 1 и 2 имеет следствием то, что тормоз работает, правда, устойчиво, но измерение делается заметно неверным, если конец рычага колеблется *не посередине* между упорными штифтами. Затяжные пружины являются существенными для надежной установки какой-либо определенной нагрузки, а достижение устойчивого равновесия — для отчетливого измерения этой нагрузки.

Нажим, таким образом, служит для двух целей: он нагружает исследуемую машину, что производится путем надлежащего подтягивания барашков, и измеряет созданную таким образом нагрузку, что производится весами или гирями. Обе функции друг от друга независимы: увеличивая груз, мы нагрузки не меняем; если же мы хотим только нагрузить машину, не имея в виду измерять эту нагрузку, то весы можно заменить просто постоянным упором.

Вместо колодки и ленты можно также применять колодки сверху и снизу, прижимая их к шкиву посредством натяжных болтов, а применением чугуна как для шкива, так и для колодок, достигнуть очень спокойного хода, если дело идет о длительном пользовании тормозным нажимом. С другой стороны, и при пользовании ленточным тормозом можно совсем устранить тормозные колодки; стальная лента, кругом охватывающая шкив, может в одном месте натягиваться посредством гайки; и здесь можно измерить путем навески уравновешивающих грузов или опорой на десятичные весы. При малой высоте шкива над полом, канат можно сперва перекинуть через блок по рис. 242. Неправильным будет присоединение каната к стальной ленте по рис. 243; когда груз колеблется вверх и вниз, плечо рычага, к которому он приложен, при этом меняется. Канат должен охватывать сверху часть окружности тормозной ленты и таким образом сбежать с нее всегда *по касательной*. Плечом рычага l для груза P является радиус шкива, увеличенный на толщину тормозной ленты и половину толщины каната.

Там, где для измерения применяются грузы, необходимо озаботиться о надежном *ограничении их колебаний*, которое представляло бы для передвижения тормозного устройства такой узкий простор, чтобы эти грузы не могли

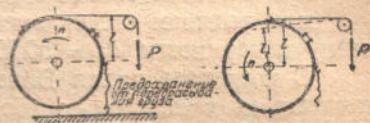


Рис. 242 и 243. Ленточный тормоз. Правильное и неправильное присоединение каната.

накопить в себе более значительных количеств энергии. Ограничение хода посредством каната или упорных штифтов должно быть достаточно эластичным, чтобы не быть сорванным резким толчком. Особенно тщательно должна производиться сборка тормозного устройства; излом какой-нибудь части легко может повести к разному грузам или других частей. Тормозные испытания особенно больших мощностей связаны с опасностями несчастных случаев. Каждое тормозное устройство должно быть предохранено от бокового соскальзывания.

Для размеров тормозного нажима еще Бахом много лет назад даны следующие указания.

$$D \cdot b \geq \frac{75}{a} \cdot N_e \quad (1)$$

Здесь D и b — диаметр тормозного шкива и ширина тормозных колодок в метрах, N_e — измеряемая мощность в лошадиных силах, a — опытный коэффициент, a — имеет следующие значения:

при воздушном охлаждении $a_1 = 5000$,

при водяном охлаждении $a_2 = 25000$,

при водяном охлаждении, больших скоростях и малых давлениях на единицу поверхности $a_3 = 50000$.

В последнее время Вильке, на основании систематической обработки ряда тщательно проведенных обстоятельных тормозных испытаний, вывел формулу, которая хотя во всяком случае дает достаточные размеры, но нередко вызывает сомнения, не работает ли тормоз на границе своей мощности. Соображения, вытекающие из приложения теории трения в цапфах к трению между шкивом и тормозом приводят к формуле

$$D \cdot b \cdot w = \frac{75}{c} \cdot N_e \quad (2)$$

где

$$c = \frac{3750}{D - 0,33}$$

Результаты вычисления по обеим формулам приведены в таблице 18.

Таблица 18
Размеры тормозных нажимов

1 см ширины шкива достаточен для таких моментов
(в кг·м)

Диаметр шкива D (м) =	0,6	0,8	1	1,5	2
По Вильке $M_{e1} =$	25	26	28	36	45
По Баху:					
$n=120, a_1 = 5000, M_{e1} =$	2,4	3,2	4,0	6,0	8,0
$a_2 = 50000, M_{e1} =$	24	32	40	60	80
$n=600, a_1 = 5000, M_{e1} =$	0,48	0,64	0,80	1,2	1,6
$a_2 = 50000, M_{e1} =$	4,8	6,4	8,0	12	16

Так как v входит также и в N_e , то, согласно Вильке, скорость не имеет никакого влияния на допустимый вращающий момент. Размеры тормозного нажима, по Вильке, зависят только от вращающего момента, так как в конечном счете развиваемое тепло определяется уничтожаемой мощностью. С другой стороны, при данном вращающем моменте, вместе с числом оборотов возрастает не только развиваемое количество тепла, но также и отвод тепла через конвекцию. Повседневный опыт учит, что при торможе-

нии в 100 л. с. можно при высшем числе оборотов обойтись зажимом меньших размеров, чем при малом числе оборотов. В последнем случае больший вращающий момент обуславливает также и большие напряжения в тормозной ленте.

При производстве тормозных испытаний лучше всего подвешивать к тормозному плечу грузы, соответствующие желаемой нагрузке, или ставить их на весы и затем в течение всего испытания регулировать натяжные ленты так, чтобы тормоз слегка колебался около среднего положения, так как возбуждае-

мое нажимом трение с течением времени меняется в довольно широких границах. При хорошей смазке маслом колебания становятся меньше; однако следует помнить, что смазка противоречит цели тормоза — создавать трение, поэтому смазка должна быть минимальной.

Смазке не идентично охлаждение, которое должно отводить тепло, возникающее из уничтожаемой работы. Оно должно быть интенсивным, что лучше всего достигается при помощи воды. Поэтому можно совершенно отделить смазку от охлаждения, щедро пуская охлаждающую воду внутрь сделанного полым шкива и скупое давая смазывающее масло между шкивом и тормозом. По рис. 248 охлаждение производится водой, натекающей в шкив, изготовленный в форме сосуда, и там испаряется. При подобной же форме венца ось такого шкива может вращаться и горизонтально, если число оборотов достаточно, чтобы удерживать воду благодаря центробежной силе на периферии. Такое устройство работает хорошо и только при остановке машины водяное кольцо сливается вместе.

Если трение, вследствие неравномерной смазки, меняется, то и при нажиме и при ленточном тормозе приходится регулировать натяжение тормоза от руки, именно таким образом, чтобы произведение из коэффициента трения на нажим тормозных колодок оставалось постоянным. *Саморегулирующиеся тормоза* такое регулирование производят автоматически.

По рис. 244 машина должна быть нагружена так, чтобы это соответствовало грузу G . Если окружное усилие делается слишком большим, то все тормозное устройство будет увлечено в направлении вращения. При этом шнур s натянется и немного отпустит тормоз. Если, наоборот, трение тормозных колодок слишком мало, то груз G оттягивает тормоз назад, а пружина F подтягивает его. При начале испытания на тормоз подвешивают желаемый груз и регулируют винт x таким образом, чтобы шнур s почти бездействовал. Сила, вызываемая натяжением шнура, вносит небольшую ошибку в результаты измерения. Эта сила во всяком случае мала, так как прилагается к длинному плечу двуплечного рычага; ее момент очень мал, если точка приложения обращена к валу.

Если желают вовсе избежать незначительной погрешности, то установочное устройство должно быть сделано самоанавливающим так, чтобы оно могло срабатывать при всяком натяжении тормозной ленты. На рис. 245 развиваемый трением момент уравнивается и измеряется грузами G_1 и G_2 . Поскольку изменяются эти грузы, изменяется также само собой и натяжение тормозной ленты. Собачки s_1 и s_2 (рис. 247) приводятся от машины в колебательное движение, причем одна стремится усилить натяжение тормозной ленты, а другая наоборот — уменьшить. Обе собачки удерживаются от этого сегментом S . Этот сегмент переставляется снаружи рычагом h в том случае, если трение не соответствует приложенному грузу; тогда все тормозное устройство поворачивается или в направлении трения или в сторону действия грузов и выходит из горизонтального положения. Тогда одна из собачек s_1 или s_2 входит в зацепление с z , и винт x изменяет натяжение тормозной ленты. Кроме этого, следует еще упомянуть о приспособлении для уравнивания собственного веса тормозного устройства. При ранее описанных тормозных устройствах нет возможности постепенно уменьшать нагрузку вплоть до холостого хода, так как наименьшая нагрузка, даже при вполне опущенном тормозе, будет определяться собственным весом тормозного устройства, с каким оно действует на шкив. Для холостого хода приходится разбирать все тормозное устройство. При тяжелых тормозах это во всяком случае весьма нежелательно, тем более, что иногда может понадобиться работать при *весьма малых* нагрузках.

Чтобы сделать это возможным, все тормозное устройство подвешивается, как это показано на рис. 245, к потолку посредством рычага с противовесом, который допускает небольшие вертикальные перемещения, уравнивая собственный вес. Переключающее устройство x , как лежащее несимметрично, уравнивается отдельно.

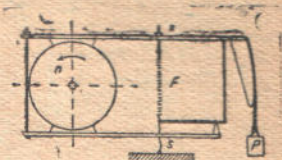


Рис. 244. Саморегулирующийся тормоз Брауера.

Другой, весьма совершенный, но не саморегулирующийся тормоз, приспособленный для лабораторных целей, изображен на рис. 248 и 249. Он пред-

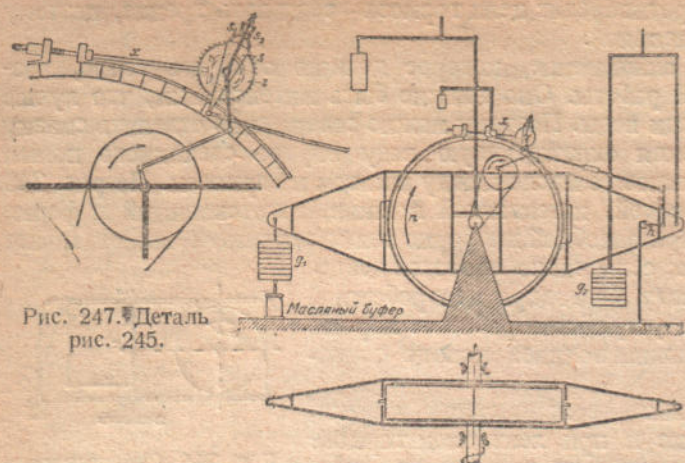


Рис. 247. Деталь рис. 245.

Рис. 245 и 246. Саморегулирующийся тормоз с уравновешением собственного веса. Массачузетский технологический институт.

назначен для исследования водяных турбин с вертикальным валом. Тормозные нажимы больших размеров, главным образом, применяются для этого рода машин, так как, вследствие медленного хода непосредственная электрическая нагрузка часто бывает невозможной, а индикатор как измерительный прибор здесь неприменим. Тормозной венец поддерживается тремя роликами и имеет грубую регулировку при помощи ручного колеса I и тонкую при помощи колеса II. Тормозной

рычаг имеет при S шаровую опору и действует на угловой рычаг, имеющий у C карданный подвес. Угловой рычаг у D опирается на десятичные весы.

Простой саморегулирующийся тормоз, изображенный на рис. 250, состоит из пенькового ремня, шириной равной ширине тормозного шкива, с приклепанными жестяными скобами, устраняющими боковые скольжения. Жестяные скобы приклепаны к ленте частью с внутренней, частью с наружной стороны; когда вследствие слишком возросшего трения ремень увлекается шкивом, то на последний набегает скобы, приклепанные изнутри; от этого общий эффект трения уменьшается. Смачиванием пенькового ремня можно достигнуть известного охлаждения тормозного шкива. Будет ли такой тормоз легко работать, это зависит от подбора грузов, которые не должны быть слишком малыми. Недостатком является то, что наружный подшипник перегружается большой силой.

В этом смысле канатный тормоз лучше. Канат подвешивается к потолку при помощи пружинного динамометра (рис. 251), обвивается один раз вокруг тормозного шкива и затем направляется вниз. К этому концу подвешиваются необходимые грузы. Грузы должны иметь такую величину, чтобы они подымались, когда шкив вращается. Разница $P - p$ между подвешенным грузом и показанием динамометра представляет окружное усилие, приложенное

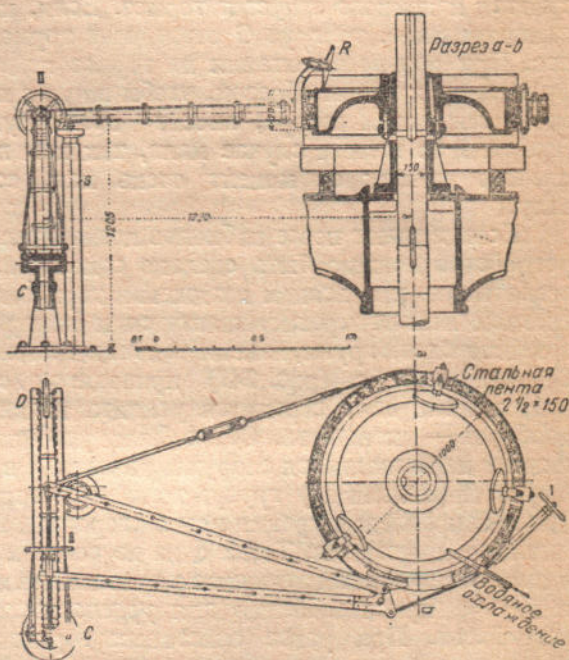


Рис. 248 и 249. Лабораторный тормоз для водяных турбин с вертикальным валом; внутреннее охлаждение, подвешивание на роликах. По Рейхелю.

к середине каната к радиусу $R + r$, т. е. радиусу шкива, увеличенного на половину толщины каната.

Канатный тормоз при большом числе оборотов работает спокойнее, чем тормозной нажим, если смазочный материал хорошо распределен по канату. В качестве смазки употребляют воду, которая может испаряться и таким образом энергично предотвращать дальнейшее разогревание, или также употребляют масло. Канатный тормоз имеет перед нажимным преимущество более простой установки, но при нем нельзя повышать нагрузку в любой степени, потому

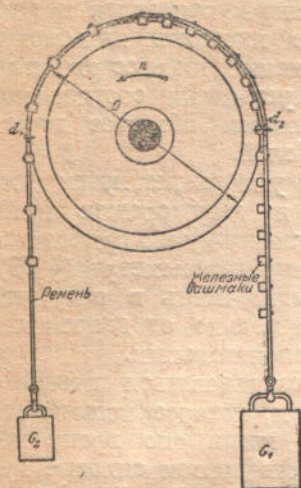


Рис. 250. Саморегулирующийся тормоз упрощенного типа.

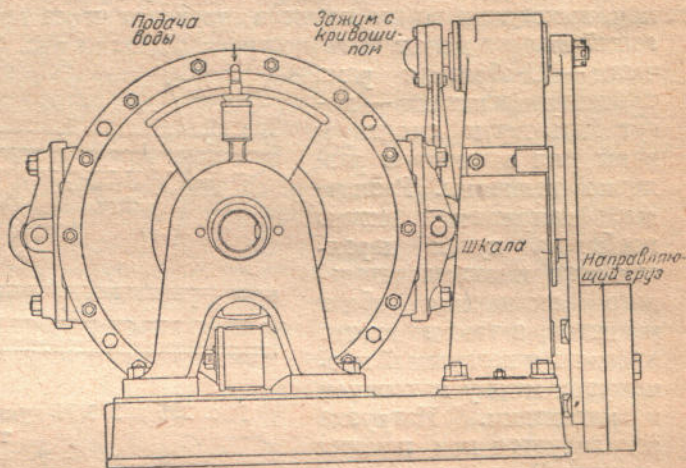
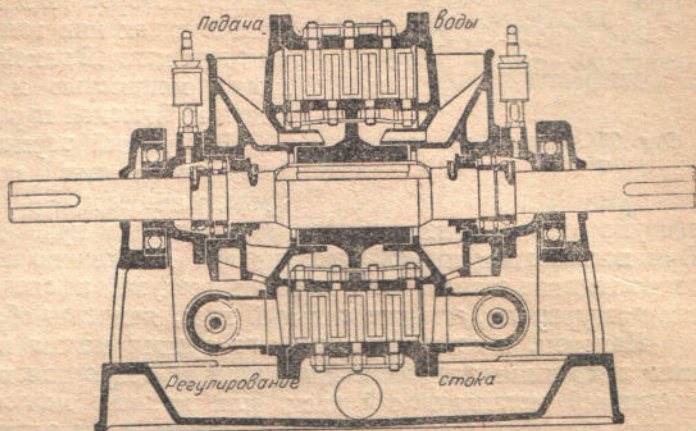


Рис. 252 и 253. Водяной тормоз завода Юнкерс, $\frac{1}{8}$ натур. величины.

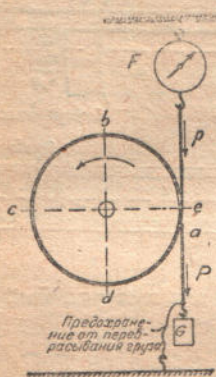


Рис. 251. Канатный тормоз.

что при дальнейшем увеличении груза только прибавляются показания динамометра на такую же величину; таким образом, мы нагружаем только динамометр, а не машину. Делая, когда это позволяют обстоятельства, несколько оборотов каната вокруг шкива, можно увеличить нагрузку. Здесь нельзя, как при нажиме, подтягивая винты, длительно поддерживать нагрузку на одном уровне. Каждое смазывание имеет следствием колебания нагрузки.

При высоком числе оборотов трение твердых тел целесообразно заменять трением жидкости (Л.). Такой жидкостный тормоз изображен на рис. 252 и 253. Развиваемый им вращающий момент зависит от степени наполнения водой и может регулироваться; при определенной степени наполнения вращающий момент возрастает пропорционально квадрату, а мощность — пропорционально кубу числа оборотов; поэтому на рис. 254 начерченная для полного наполнения кривая представляет кубическую параболу; вместе с линией наибольших

допускаемых моментов и допустимых чисел оборотов эта парабола ограничивает область, в пределах которой применим данный тормоз.

Для высокого числа оборотов вместо водяного тормоза применим также воздушный тормоз; пропеллеры самолетов показывают, что при числе оборотов

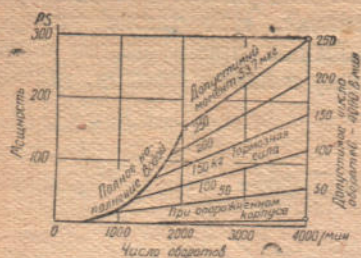


Рис. 254. Область применения тормоза рис. 252.

свыше 1000/мин такими пропеллерами могут быть переданы воздуху значительные мощности. Применяются двухлучевые воздушные крылья, в которых сопротивление создается лопатками, расположенными наклонно к направлению движения, которое можно изменять или сменой этих лопаток или изменением их расстояния от оси; для каждой такой установки соотношение между мощностью и числом оборотов дается опять кубической параболой.

Воздушный тормоз уничтожает путем торможения энергию, но не дает средств непосредственно ее измерять; поэтому его приходится

градуировать при помощи электромотора или приводного динамометра (§ 99). При пользовании кривой градуировки необходимо всегда иметь в виду, что сопротивление зависит от плотности воздуха, а следовательно от давления и температуры; это, а также сильный шум, является обременительным.

Наконец, вместо механического трения можно воспользоваться вызываемым вихревыми электрическими токами сопротивлением, которое испытывает массивный металлический диск, или маховое колесо, когда оно вращается в поле сильного электромагнита. Возбуждаемые электромагнитом силовые линии, выходящие из его полюсов, проходят через тело маховика. Такой индукционный тормоз может быть построен согласно рис. 255 и 256. Его существенные части — U-образная рама с электромагнитами — могут быть легко смонтированы для маховиков различной величины. Различные напряжения можно подбирать путем параллельного и последовательного включения обоих магнитов, а также можно изменять и воздушный промежуток между маховиком и магнитами. Нагрузка регулируется при помощи реостата, посредством которого меняется сила тока, равная нескольким амперам. Полученная нагрузка затем измеряется точно так же, как и при нажиме; только способ получения нагрузки здесь другой.

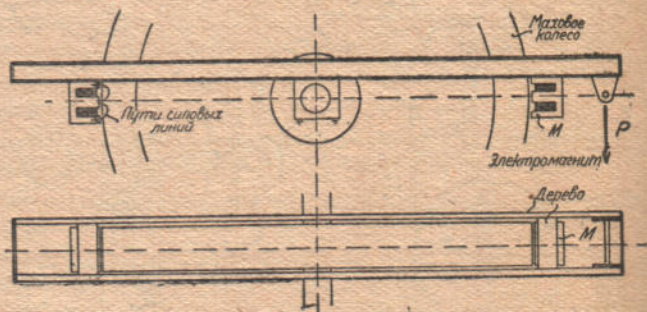


Рис. 255 и 256. Индукционный или гистерезисный тормоз.

Полученная нагрузка затем измеряется точно так же, как и при нажиме; только способ получения нагрузки здесь другой.

Такие индукционные тормоза весьма удобны в работе и хорошо применимы при умеренных нагрузках или при кратковременных испытаниях. При длительных испытаниях и больших мощностях отвод развиваемых количеств тепла представляет трудности. Воду здесь применить затруднительно. Температура маховика при этом может возрасти выше, чем это допустимо для чугунных шкивов с точки зрения производственной безопасности.

Если диск, в котором возбуждаются вихревые токи, сделан из меди или латуни, то такой тормоз является индукционным. Если же он железный, то его части, проходящие перед магнитами, сами намагничиваются и вследствие постоянных перемагничиваний возникают потери на гистерезис; тормоз становится частично или преимущественно гистерезисным¹. Это проявляется сле-

¹ Это, отмеченное в прежних изданиях различие, здесь повторяется с замечанием, что в данном случае дело идет о попытке объяснить действительно наблюдавшийся у таких тормозов неожиданный ход кривой сопротивлений при меняющемся числе оборотов.

дующим образом: потери энергии от вихревых токов возрастают пропорционально квадрату числа оборотов, потери от гистерезиса — пропорциональны числу перемагничиваний, т. е. пропорциональны числу оборотов. Таким образом, возбуждаемый при изменении числа оборотов вращающий момент будет, при чистом случае торможения вихревыми токами, пропорционален первой степени числа оборотов, а при чисто гистерезисном торможении будет постоянным, независимым от числа оборотов. Последнее часто является нежелательным. Гистерезис можно уменьшить применением очень мягкого железа, а при чугунах — помимо того специальным расположением полюсов магнитов (иначе чем на рис. 255). Именно располагают их так, что никакая часть колеса не подвергается перемагничиванию, а намагничивание совершается постоянно в одном направлении, от нейтральной линии к северному полюсу и от нейтральной к южному; для этого полюса должны располагаться один за другим в осевом направлении.

Относительно *совместной работы тормоза и тормозимой силовой машины* необходимо иметь в виду следующее.

Различные тормозные динамометры ведут себя различно при изменениях числа оборотов. Нажим, ленточный тормоз и канатный тормоз развивают независимый от числа оборотов вращающий момент, так как коэффициент трения твердых тел не зависит от скорости. При гидравлических тормозах, при индукционных и при описываемом далее электрическом торможении с помощью динамомашин, при возрастающем числе оборотов, увеличивается также и вращающий момент (при гидравлических тормозах, даже пропорционально квадрату числа оборотов).

Нечто аналогичное мы находим у силовых машин. Если мы не будем сперва обращать внимания на воздействие регулятора, то поршневая машина, установленная на постоянную степень наполнения, будет при любом числе оборотов развивать почти одинаковый вращающий момент. У турбин же, при возрастании числа оборотов, развиваемый вращающий момент быстро убывает и, как известно, у них вращающий момент обращается в нуль, когда они достигают приблизительно удвоенного нормального числа оборотов. Поэтому тормозные испытания паровой машины не следует производить при помощи тормозного нажима: когда оба вращающих момента — движущий и момент сопротивления — хорошо уравновешены, машина идет спокойно; небольшое изменение в нажиме тормоза или позволит машине разогнаться или ее остановит. Так резко эти соотношения, конечно, не проявляются, главным образом вследствие явлений мятя пара в паропроводных каналах, благодаря которому вращающий момент паровой машины все-таки медленно убывает при возрастающем числе оборотов. Поэтому установившийся ход заторможенной нажимом паровой машины не является очень устойчивым. Во всяком случае, хороший регулятор заставляет машину идти со своим числом оборотов.

Во всех описанных тормозных испытаниях для измерения вращающего момента применялись грузы или непосредственно, или через посредство весов, или совместно со вспомогательным динамометром (рис. 256).

Действительно, уравновешивание вращающего момента непосредственно грузом может дать измерению наибольшую точность, однако лишь при условии постоянного поддержания равновесия на тормозе, что является далеко не легкой задачей и в сильнейшей мере зависит от ловкости экспериментатора и требует неусыпного внимания. Всякое же отклонение от равновесия остается неучтенным и понижает высокую теоретическую точность метода, при том неизвестно насколько.

При применении для измерения вращающего момента динамометра, особенно самопишущего, отпадает необходимость точного поддержания нагрузки на одном уровне, так как динамометр указывает малейшие изменения нагрузки, которые таким образом могут быть всегда учтены. При самопишущем динамометре, давая ленте ход от испытуемой машины, мы получаем диаграммы, площадь которых прямо выражает отданную машиной работу в соответственном масштабе.

Хотя точность испытания в этом случае ограничена точностью имеющегося динамометра, но в виду значительно большей независимости результатов испытания от искусства экспериментатора, в конечном счете результаты могут мало уступать обычному испытанию гириями. К тому же ожидаемая ошибка в этом случае более или менее известна.

Поэтому, располагая удовлетворительным динамометром, не следует пренебрегать его применением для тормозных испытаний, которые при этом существенно упрощаются и облегчаются.

Нужно только иметь в виду сказанное относительно собственных вибраций пружины динамометра. Влияние таких вибраций при тормозных испытаниях легко может быть обезврежено применением масляных успокоителей (рис. 245 слева внизу). (Прим. перев.).

§ 99. Приводные динамометры и соответствующие динамометрические методы измерения. Тормозные испытания представляют значительные трудности, когда дело касается больших вращающих моментов, а именно, когда приходится преодолевать большие мощности при сравнительно низком числе оборотов. Вместе с величиной вращающего момента возрастают и размеры тормозного устройства и уравнивающие грузы, одновременно — и опасность для обслуживающего персонала с случае какой-нибудь поломки; особенно также затруднительно отведение образующихся больших количеств тепла. При больших мощностях и одновременно больших числах оборотов можно применять жидкостные тормоза, при которых отвод тепла облегчается. С их помощью можно производить тормозные испытания и больших паровых турбин.

Таким образом, при больших вращающих моментах тормозные испытания трудно осуществимы. Сверх того, они всегда имеют тот недостаток, что вся поглощенная тормозом энергия является чистой потерей; при больших мощностях это является расточительностью. Точно так же торможением можно установить только средний вращающий момент, но никак не его колебания в течение одного оборота. Кроме того, само собою разумеется, что тормозные испытания применимы только для силовых машин, которые производят энергию. Между тем определение потребления энергии машинами — орудиями должно производиться таким способом, чтобы она могла быть использована этими машинами.

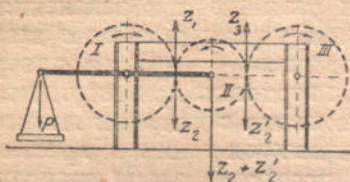


Рис. 257. Приводной динамометр Киттлера, измеряющий давление на зуб.

Приводные (трансмиссионные) динамометры представляют аппараты, измеряющие передаваемый ими вращающий момент, без уничтожения энергии; поэтому они для производства измерения включаются в самый процесс передачи энергии и должны по своей величине быть приспособлены к пропуску через себя всей передаваемой энергии. Так как при больших количествах энергии трудно подобрать подходящий динамометр, то в последнее время все больше применяют такие динамометрические методы, которые, посредством пристройки только наблюдательных устройств, позволяют определять вращающие моменты, передаваемые через существующие части исследуемых машин. Некоторые формы таких устройств позволяют наблюдать даже колебания вращающего момента в течение отдельного оборота.

Приводные динамометры, как и тормозные, измеряют непосредственно только вращающие моменты. Чтобы найти передаваемую энергию (работу или мощность) остается еще определить число оборотов.

Один род динамометров, который можно определить как *приводные динамометры*, определяет силы, возникающие в зубчатой или ременной передаче, и измеряют таким путем передаваемый этой передачей вращающий момент.

Важнейшим между ними является динамометр, измеряющий давление между зубьями (рис. 257). Измеряемая энергия подводится к валу зубчатого колеса I посредством ременного шкива и снимается с вала зубчатого колеса III посредством такого же шкива. Зубчатые колеса I и III укреплены в станине, зубчатое колесо II на коромысле весов, при холостом ходе это коромысло уравновешено. Если от I к III через II передается вращающий момент и колеса вращаются в направлении стрелок, то между зубьями возникают давления Z_1 и Z_2 , Z_3 и Z_2' в направлениях, указанных на чертеже. На ведущем колесе I давление на зуб Z_1 должно быть направлено навстречу движению, оно представляет сопротивление, испытываемое колесом; на ведомое колесо II действует Z_2 в направлении вращения, оно двигает колесо. В паре колес II — III, II является ведущим, а III — ведомым и поэтому на II давление Z_2' должно действовать навстречу движению, т. е. вниз. Таким образом, на колесо II обе силы Z_2 и Z_2' действуют сверху вниз, и их сумму $Z_2 + Z_2'$ можно измерить у P. Если мы пренебрежем небольшими

потерями от трения в подшипниках колеса II , то очевидно, что $Z_2 = Z_2' = 2Z$; таким образом, у P мы измеряем $Z_2 + Z_2' = 2Z$. Если r_3 будет радиус колеса III и n_3 его число оборотов, то отданная динамометром мощность в лошадиных силах будет $N = \frac{2\pi r_3 n_3 Z}{60 \cdot 75}$.

Начальные окружности колес II — III только тогда имеют правильное положение, когда коромысло весов уравновешено и потому горизонтально. Поэтому для колес необходимо применять эвольвентное зацепление.

Перед употреблением приводного динамометра необходимо определить или компенсировать его *собственное трение*. Измеряется не вращающий момент на приводном валу, который нам желательно знать, а момент передаточного колеса II . Он отличается от искомого вращающего момента (если не касается передаточного числа зубчатых колес) тем более, чем больше развивается трение в зубчатой передаче. Поэтому, если даже приводной вал вращается совершенно вхолостую, все-таки на шкале будет некоторое отклонение. Этот момент вращения собственного трения необходимо затем вычесть из каждого дальнейшего отсчета, в качестве поправки; или можно уравновесить это отклонение холостого хода добавкой соответствующего груза так, чтобы показания динамометра при холостом ходе колебались около нуля. Теряемый, вследствие трения, момент остается при всех нагрузках одинаковым, что является лишь весьма приблизительным допущением; поэтому лучше всего непосредственно отградуировать динамометр. При градуировании динамометр должен работать с тем числом оборотов, при котором им потом будут пользоваться. Это следовало бы повторять перед каждым употреблением динамометра, так как трение непостоянно.

Ременные динамометры едва ли применимы на практике.

Приводные динамометры (под таким наименованием мы объединили динамометры зубчатой передачи и ременные динамометры) расходуют работу, а поэтому подвержены изнашиванию. Описанные дальше взвешивающие динамометры расходуют работу только в опорах, поэтому менее подвержены износу.

При *взвешивающих динамометрах* передаваемый через вал вращающий момент устанавливается путем взвешивания; для этого на известном расстоянии от оси вращения измеряют передаваемое окружное усилие по одному из применимых для измерения сил методов; для этого можно воспользоваться рычажными устройствами, гидравлическими измерителями или пружинами. Трудностью является устранение влияния центробежной силы на измерительные устройства, но главная трудность — это отчетливо передать данные наружу, несмотря на вращение всей системы; для этого могут служить механические и оптические устройства.

Динамометр Фишингера основан на принципе рычажных весов (фиг. 258). Из двух ременных шкивов S_1 и S_2 один является приводным, другой служит для передачи ремнем. Вращающий момент должен быть измерен при переходе от одного шкива к другому. Передача происходит посредством рычага ab , опирающегося на опорные поверхности во впадинах A и B в обоих шкивах, причем один из шкивов является ведущим и увлекает другой. Вследствие этого в валу c возникает вращающий момент, пропорциональный измеряемому, и рычаг d производит небольшое отклонение до своего ограничителя. Вследствие этого при посредстве двуплечевого рычага l , стержень j выталкивается через полый вал наружу. Тогда на чашку весов у G накладывают гири, пока стержень j опять не будет вдвинут обратно на прежнее место, а следовательно и вся система рычагов, которая при этом продолжает вращаться совместно с ременными шкивами

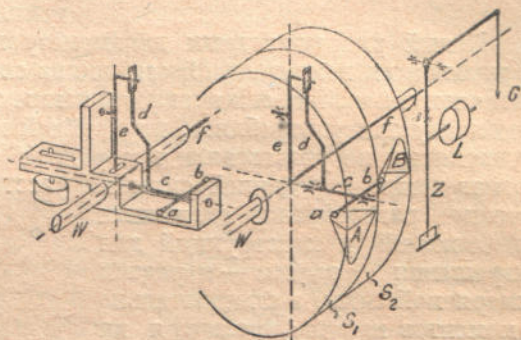


Рис. 258 и 259. Динамометр Фишингера.

вокруг оси, не возвратится в свое среднее положение. Тогда указатель Z опять останавливается на своей нулевой метке. Наложенный груз служит мерой передаваемого момента, и точка подвеса чашки для гирь может быть выбрана так, чтобы 1 кг на чашке соответствовал 10 кг окружного усилия на обоих (одинакового размера) ременных шкивах: передача $1 : 10$. Рис. 259 дает представление о расположении рычажного механизма в крестовом суппорте. Этот суппорт сидит прочно на валу W , оба ременные шкива — свободно. Противовес служит для уравнивания вращающихся масс. Подвижный груз L служит для выверки (Л.). Динамометр Фиттингера является компенсационным прибором и поэтому, а также благодаря своей большой инерции, не подходит для измерения меняющихся моментов.



Рис. 260 и 261. Пружинный приводной динамометр.

Целый ряд приводных динамометров конструируется таким путем: два вращающиеся вокруг одной оси шкива связываются посредством динамометра, расположенного вне оси вращения таким образом, что один шкив ведет другой; рекомендуется употреблять, по крайней мере, два динамометра, чтобы осевые подшипники не участвовали в передаче пары сил. Вращающий момент равен произведению переданной силы на расстояние динамометра от оси. Имеется большое разнообразие сделанных предложений и конструкций для разрешения задачи — передачи измеряемой силы, а следовательно и моментов наружу, несмотря на вращательное движение. Общий принцип может быть изъяснен рис. 260 и 261: вращающий момент передается от одного вала другому, ему коаксиально, посредством пружин $F_1—F_4$, общее сжатие которых, а следовательно и взаимный поворот шкивов, относительно друг друга, служит мерой передаваемого момента. Этот взаимный относительный поворот делается заметным снаружи посредством прорезей S_1 и S_2 , через которые глаз наблюдателя может видеть свет от лампы: световой зайчик при возрастающем вращающем моменте передвигается изнутри наружу. Перед прибором можно установить неподвижную шкалу.

С пружинами, изображенными на рис. 260, очевидно, нельзя достигнуть никакой высокой собственной частоты между обоими шкивами, особенно, если массы их значительны. Вместо пружин следует применять мессдозы, кварцевые кристаллы, короче говоря, все описанные в § 97 динамометры. При гидравлических приборах неудобно выводить высокое давление через полый вал. Таким образом, снова приходится обращаться к оптическим методам отсчета. Такой отсчет применен в устройстве, изображенном на рис. 262, в котором сменный измерительный стержень из специальной стали работает на кручение; воздушная защита по Фивегу должна устранять происходящие от сопротивления воздуха ошибки. При числе оборотов свыше $800/\text{мин}$ видно постоянное немигающее изображение, затруднения может вызвать только недостаточная освещенность, так как источник света плохо используется. Динамометр изготавливается и с электрическим отсчетом: относительным взаимным смещением дисков переставляется делитель напряжения; рабочее напряжение подводится к делителю и отводится от него через три контактных кольца. Описание дается в Л. 272, точность меньше, чем при оптическом отсчете. Однако, последний пригоден для измерения только при сравнительном постоянстве вращающего момента,

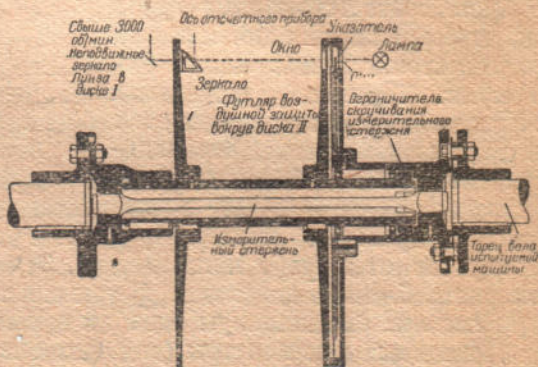


Рис. 262. Торсионный динамометр с воздушной защитой, фирмы «Бамаг».

тогда как электрический метод дает среднее значение колеблющегося момента в течение одного оборота или позволяет записать эти колебания при помощи осциллографа.

Часто желательно или необходимо оставить нетронутым взаимоотношение частей и по ним, без промежуточного включения специального динамометра, произвести измерения. В таких случаях приходится использовать какой-нибудь вал или муфту в качестве измерительной пружины; при достаточно длинных валах, их собственная упругость оказывается достаточной. Для этого можно надвинуть на вал трубу по рис. 262, отделив ее от вала небольшим промежуток.

Предназначенный для валов судовых машин динамометр Фоттингера работает по этому принципу и будет описан дальше. Для того чтобы измерить отдачу работы паровой турбины динамомашине, лучше делать соединение между обеими машинами не таким жестким, применяя, например, соединительные диски и стягивая их точно рассчитанными и тщательно изготовленными шкворнями. Необходимо принять меры против поломки.

В самых устройствах для отсчета также стараются избежать всяких промежуточных устройств в самой машине и применяют чисто оптические способы отсчета.

На валу (рис. 263 и 264) или на обоих фланцах упругой соединительной муфты установлены призмы полного внутреннего отражения P_1 и P_2 , которые могут быть заменены зеркалами, если хотят избежать ухудшения изображения при двойном отражении. Через эти призмы наблюдается шкала S посредством зрительной трубы. Собирающая линза L располагается так, чтобы шкала приходилась в ее фокусе и отраженные в зрительной трубе лучи шли между

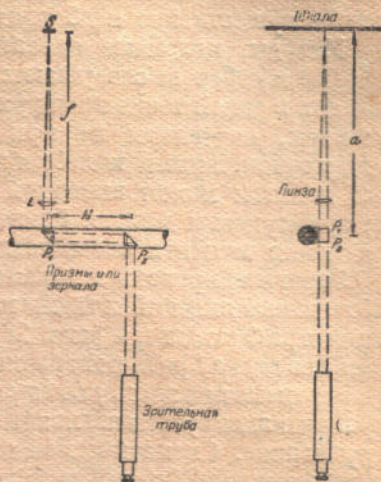


Рис. 263 и 264. Оптический отсчет кручения вращающегося вала по Фивегу (Л.).

призмами параллельно. Ребра призмы строго параллельны и направлены перпендикулярно к оси вала; для подобных работ обыкновенно употребляется окуляр Гаусса с освещением креста нитей.

Когда вал вращается, шкала в зрительной трубе кажется неподвижной, если она вообще находится в поле зрения; нити зрительной трубы стоят на одном и том же деле-

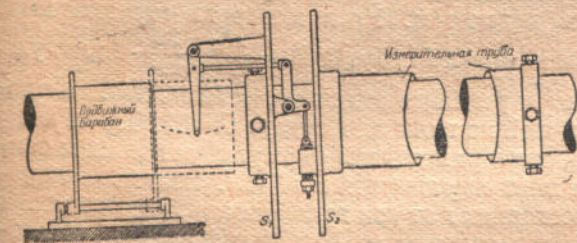


Рис. 265. Схема динамометра Феттингера.

нии шкалы, которое, при достаточном числе оборотов вала, также видно непрерывно. Но как только, благодаря скручиванию вала, его сечения A и B поворачиваются друг против друга на угол δ , изменяется также и взаимная установка призм, и крест нитей перемещается по изображению шкалы на s делений шкалы. Тогда $\text{tg } \delta = s/f$ или, в виду малости угла δ приближенно $\delta = s/f$ (значение имеет фокусное расстояние f , а не расстояние a).

Какой момент соответствует повороту δ и, следовательно, отсчету s шкалы, должно быть установлено градуировкой. Можно насаженный и прочно укрепленный на одном конце вала рычаг опереть на весы и, скручивая вал другим рычагом или осторожно открывая паровой вентиль, создать вращающий момент,

который и измеряется весами. Следует избегать изгиба вала, так как это вызовет перекося призмы.

Мне неизвестно (А. Грамберг), насколько подобные методы, весьма многочисленные, являются практически употребительными, например, для определения механической мощности больших турбоагрегатов. Их разработка в этом смысле существенно не ободима.

Методы, подобные описанным, применимы только тогда, когда подача энергии и отбор ее совершаются равномерно, так что достаточно измерение в момента в одной точке по окружности. Это обыкновенно и имеет место при турбомашинах, но никак не при поршневых. Но и в турбомашине резонанс между собственными колебаниями вала или соединительной муфты и турбинных лопаток может вызывать периодические колебания передаваемого момента; при судовых винтах близость поверхности воды вызывает периодические изменения момента соответственно числу лопастей винта.

Зарегистрировать эти изменения и отсюда определить причины таких колебательных явлений, а также найти передаваемую мощность, является целью динамометра Феттингера (рис. 265). Так же как и у динамометра Бамаг (рис. 262) здесь два диска S_1 и S_2 поворачиваются друг относительно друга, и это относительное перемещение здесь регистрируется. Измерительная труба и регистрирующий барабан надвинуты на главный вал корабельной турбины и регистрируют его скручивание. Схематическое изображение не позволяет показать ряд существенных приспособлений и подробностей; таково особенно устройство, которое позволяет на ходу машины опускать пишущий штифт на барабан и поднимать его. Это производится винтовым шпинделем, маховичок которого при каждом обороте задевает за выступ и таким образом каждый раз поворачивается на один зуб вперед или назад, в зависимости от того, какой упор установлен; подобная подача обычна у машин для расточки цилиндров и для подачи суппорта. У этого динамометра имеются два пишущих устройства, расположенных симметрично друг к другу по обеим сторонам вала.

Площадь диаграммы, ограниченная кривой вращающих моментов, определяет работу, поскольку отклонения карандаша пропорциональны вращающим моментам. Масштаб моментов при меньших машинах может быть определен экспериментально. При валах судовых машин на много тысяч лошадиных сил, для которых динамометр Феттингера главным образом применяется, масштаб отклонений приходится определять подсчетом. Угол поворота отрезка вала длиной l и диаметра d под действием момента M_d будет $\vartheta = \frac{M_d}{G} \cdot \frac{32}{\pi d^4} \cdot l$; модуль сдвига G материала вала необходимо определить отдельно, если не хотят положить на значение G для стали, идущей на валы для судов: $G = 829\,000 \text{ кг/см}^2$; как это значение, так и все данные вышеприведенной формулы, отнесены к сантиметру, поэтому и вращающий момент выражается в $\text{кг}\cdot\text{см}$. Взаимное перемещение обоих дисков S_1 и S_2 на расстояние r от оси вращения поэтому составит $r \cdot \vartheta$ и затем увеличивается рычажным механизмом. Длина диаграммы соответствует углу поворота 2π .

В динамометре Феттингера передающий силу вал, выполняющий роль измерительной пружины, настолько жесткий, что его собственное число колебаний лежит далеко выше числа колебаний, соответствующего колебаниям вращающего момента. Его демпфирование незначительно и является чисто молекулярным. На этом основании такое измерительное устройство является превосходным для графической регистрации колебаний вращающего момента. Для исследования записанных колебаний необходим гармонический анализатор. Таким образом, оказалось, что при известных обстоятельствах, благодаря явлениям резонанса, наибольшие возникающие в валах вращающие моменты во много раз превышают средние, и аварийные поломки судовых валов могут быть объяснены тем, что валы рассчитываются только статически и частото только на средний вращающий момент. Относительно подробностей мы отсылаем к работам Фрама и Феттингера (Л.).

Значение приводных динамометров раньше было ничтожным, как это можно видеть по литературе: они представляют особенно благодарное поле для изобре-

тательности, так как дают повод для интереснейших, но редко имеющих широкое практическое применение, конструкций. Только с распространением чисто ротационных машин — турбин, центробежных насосов и вентиляторов возникла потребность в динамометре, пригодном для измерения больших мощностей, так как эти машины нельзя индцировать.

§ 100. Определение мощности по величине реакции. Вместо того, чтобы определять вращающий момент, развиваемый какой-нибудь машиной — двигателем, путем торможения, можно наоборот определить реакцию давления, которое испытывает станина машины под влиянием реакции воспринимающих работу частей. Чтобы эту реакцию, которая обыкновенно воспринимается фундаментом и потому недоступна измерению, сделать измеримой, весь корпус машины свободно подвешивают и снабжают рычагом определенной длины для измерения вращательного момента (Л.).

Подобное устройство для измерения реакции может быть поставлено на исследуемую машину, как вспомогательный механизм, подобно тормозу (*подвесная динамо*). Но можно и станину исследуемой машины установить таким образом, чтобы было возможно измерить испытываемую ею реакцию. Для этого машину нужно, с одной стороны, прочно опереть на призмы, а с другой — поставить на платформу весов, и затем, когда все устройство будет протарировано, момент, поворачивающий станину, можно будет найти как произведение показания весов на расстояние до точки опоры. Можно также установить машину на поплавке, и, когда под влиянием измеряемого момента получится перекося, прежнее положение восстанавливают при помощи ватерпаса добавкой соответствующих грузов. Оба способа имеют тот общий недостаток, что вал машины при этом перемещается. Между тем развиваемую мощность необходимо отвести из этой подвижной системы, так как ее необходимо или уничтожить или использовать. Таким образом, мы подходим к формам подвеса, коаксиальным с валом машины. Такой метод применим и к машинам-орудиям. Можно на такую машину установить приводящий ее в движение мотор на весу и получить в виде *подвешенного мотора* противоположность подвесной динамо. Но можно также и самый корпус рабочей машины подвесить на собственном валу, но укрепив теперь (основательно) ее мотор, подводя таким образом *механическую* энергию от неподвижной к подвижно подвешенной системе. Подвес должен быть коаксиальным с осью вращения или необходимо прибегнуть к шарнирам Кардана или гибкому валу. Однако при их употреблении в подвесной системе легко возникают добавочные мешающие силы.

Для измерения моментов служат, как и при тормозном нажиме, грузы или весы с подвижной гирей. Если при поршневых машинах мешают возникающие пульсирующие силы, то необходимо позаботиться, чтобы станина стояла спокойно, распределив достаточно тяжелые массы. Если же необходимо этот меняющийся момент регистрировать, то можно применить мессдозу с регистрирующим устройством и вообще подходящий регистрирующий динамометр с высоким числом собственных колебаний. Необходимо, чтобы качательные движения станины были возможно малыми, так как она большей частью имеет значительную массу, и силы, развиваемые такими массами, могут быть весьма большими.

Фактическое измерение реакции часто весьма затруднено, хотя принципиально и возможно. Например, при колесе Пельтона реакция водяной струи может дать требуемый вращающий момент; однако, устройство подвода воды (посредством пружинящих труб), вероятно, представит известные затруднения. Если в качестве нагружающей машины применить вместо подвесной динамо центробежный насос, корпус которого подвешивается («Исследование машин» — 126), то получается устройство, имеющее большое сходство с водяным тормозом, с тем различием, что корпус всегда наполнен, и регулировка производится дросселированием исходящего потока воды, что равносильно искусственному изменению высоты подачи. Уничтожение энергии происходит, таким образом, вне корпуса тормоза.

Следующие *теоретические замечания* относятся к случаю подвесной динамо и могут быть приложены и к другим случаям (подвесной мотор, подвес самого корпуса машины).

Так как действие и противодействие равны друг другу, то на корпусе принципиально измеряется тот же самый момент, который при тормозных испытаниях измеряется на валу. Оба момента различаются только на величину *механических потерь*, которые получаются у обеих вращающихся относительно друг друга частей (далее мы будем называть их *статором* и *ротором*). Эти потери в общем бывают двоякого рода: во-первых, потери на трение в подшипниках ротора в статоре, которые мы обозначили через R_1 , во-вторых, часть V вентиляционных сопротивлений, которые ротор испытывает при своем вращении в воздухе. Потери трения переходят без изменения и на статор, тогда как вентиляционные потери — лишь настолько, насколько возбужденные ротором воздушные точки достигают статора и затухают на нем. Необходимо принять во внимание и сопротивления, которые вызывает подвес машины. Для такого подвеса применяют опоры на призмах или большей частью шариковые подшипники. В обоих случаях сопротивления весьма малы. Мы будем везде обозначать их через R_2 . Для того, чтобы оценить их влияние, разберем два случая. Или мы опираем всю состоящую из статора и ротора систему в одной точке *ротора*, обыкновенно на его вал. Тогда R_2 всегда будет направлено против направления вращения ротора; в этом случае статор окажется подвешенным на валу ротора. Или же вся система подпирается таким образом, что вся *станина* вместо того, чтобы быть жестко связанной с фундаментом, устанавливается на шариковых подшипниках достаточных размеров, которые с своей стороны опираются на фундамент. В этом случае статор может качаться в этих добавочных подшипниках, ротор же вращается в статоре. Так как статор качается, то силы R_2 имеют в этом случае положительный или отрицательный знак, в зависимости от направления качательного движения в данный момент.

Если обозначить развиваемый на валу вращательный момент через M_e , а вращающий момент, измеренный на плече рычага через M_d , то получится отношение $M_e = M_d + V + R_1 \pm R_2$, если подвешен статор, или $M_e = M_d + V + R_1 + R_2$, если подвешен ротор. V означает только ту часть вентиляционных потерь, которые, как оговорено выше, теряются на статоре.

Ввиду меняющегося знака перед R_2 в первом случае, второе устройство — когда подперт ротор — является предпочтительным, тем более, что сопротивления в шариковых подшипниках незначительны. Сумма сопротивлений $V + R_2$ или соответственно $V + R_1 + R_2$ может быть определена экспериментально, если заставить динамо работать вхолостую при том же числе оборотов, как электромотор. В этом случае, нужно иметь в виду (опять в противоположность методу, излагаемому в § 101, при котором также часто собственные потери динамо определяются испытаниями при холостом ходе), что электрические потери, особенно развивающиеся в якоре и обмотке джоулево тепло, не имеют никакого влияния на результаты измерения. Таким образом, при холостом ходе определяются те же потери, какие имеются при полной нагрузке, если только нет заметного влияния следующих источников погрешностей: при недостаточно устойчивой установке могут возникнуть, в зависимости от степени намагничивания, перемещения ротора по отношению к статору, в аксиальном и радиальном направлении; вследствие нагревания возможны перемещения центра тяжести статора; подвод тока к статору может измениться, поэтому подвод тока лучше всего осуществлять при помощи пружинящих шин. Что касается статических отношений, то они аналогичны тому, что было сказано в § 98 относительно тормозных нажимов. Постепенная тонкая регулировка нагрузки, достигавшаяся там при помощи пружин, здесь достигается реостатами для тонкого регулирования тока возбуждения или внешней цепи тока, например, при помощи водяного сопротивления. Для точности измерения желательно, чтобы точка опоры рычага лежала на одной высоте с осью машины. Это необходимо для того, чтобы небольшой подъем или опускание последней против среднего положения не вызывали никакого изменения действующей длины плеча рычага.

На рис. 266 и 267 изображен *испытательный стэнд* для авиамоторов, соединяющий в малом пространстве все необходимые для их исследования измерительные приспособления. В нем обслуживание и все отсчеты перенесены на лобовую сторону станка, где наблюдатель защищен железным кожухом от

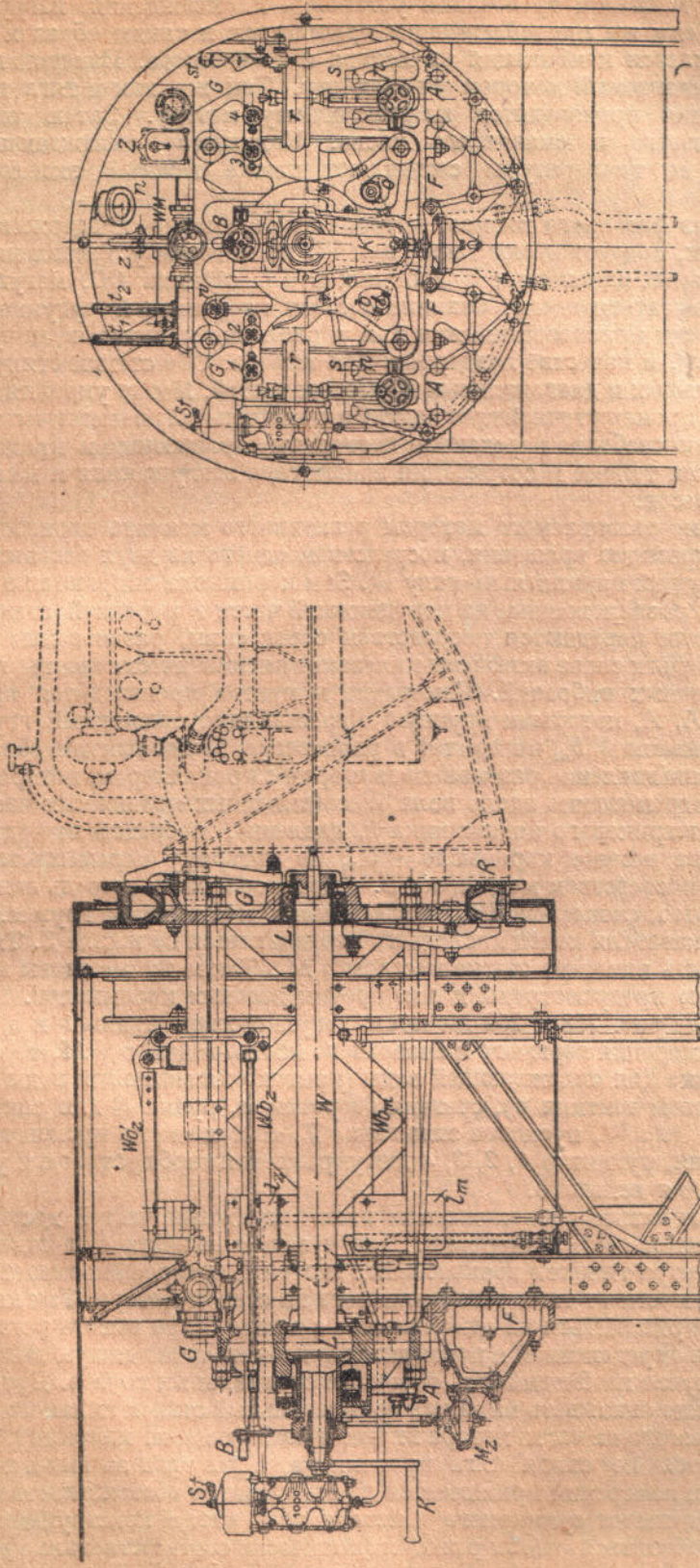


Рис. 266 и 267. Испытательный стэнд для анемометров с измерением противодавления.

неприятного обдувания пропеллером. Чтобы по возможности сохранить рабочие условия в отношении требований установки и охлаждения, нагрузку мотора производят ему же *принадлежащим пропеллером* и таким образом исследованию подвергается комбинация из мотора и пропеллера. Измерению подлежит момент, передаваемый мотором пропеллеру. Так же, как и тяга пропеллера, оба измерения производятся по реактивному методу. Затем определяется расход горючего и смазочного масла. Количество охлаждающей воды и повышение ее температуры составляют также важные эксплуатационные данные.

Козлы из фасонного железа, которое одновременно поддерживают упомянутый кожух, поддерживают также вал W , на котором установлена, посредством специальных шариковых подшипников LL станина GG , могущая и вращаться и двигаться вдоль. Станина состоит из фасонной чугунной передней стенки со всеми приспособлениями для управления и отсчетов и чугунной же задней стенки, в качестве поддержки для мотора. Обе стенки стянуты посредством продольных и диагональных железных частей. Мотор укрепляется на задней стенке, с промежуточной прокладкой автомобильной пневматической шины R , через которую свободно передаются постоянные вращающие и продольные усилия, тогда как толчки и сотрясения авиамотора заглушаются и не передаются на призмы весов.

Измерение развиваемого мотором реактивного момента производится, смотря по направлению вращения, посредством одного из двух весовых коромысел Wb_m , идущих параллельно валу W . Эти коромысла опираются призмами ss на опоры pp , расположенные на неподвижной части F передней стенки, и на их короткие плечи передаются посредством серег силы, развиваемые подвижной частью G ; в серьги снова включены маленькие пневматические шины r для устранения остаточных вибраций. Измерение моментов производится при помощи маховичков A, A , которыми вручную переставляют подвижный груз l_m , пока весовое коромысло Wb_m не придет в равновесие. Подобным же образом измеряется тяга или давление, развиваемое мотором с пропеллером, которое вызывает продольное перемещение вдоль вала W соединенных подвижных частей. Тяга, посредством шарикового подшипника k , давление, посредством подшипника l , передаются на весовое коромысло Wb'_z , по которому перемещается подвижный груз l_z , посредством маховичка B , и которое в свою очередь связано серьгой с весовым коромыслом Wb_z , нагруженным постоянным грузом. Заостренный в виде указателя конец последнего передвигается по шкале Z . Тяговое усилие может быть измерено также мерсдозой M_z . Такие же мерсдозы могут быть по требованию предусмотрены и для прочих весовых коромысел. На испытательном станде рис. 258 и 259 имеются: регулирующие краны b и o , пробники St и st для измерения горючего и смазочного масла, водомер WM , термометры t_1 и t_2 в проводке для охлаждающей воды (приток охлаждающей воды регулируется посредством вентиля w), счетчик оборотов n , ручка K для завода мотора через полый вал W , пусковое зажигание Z , состоящее из пускового магнето и выключателя, рукоятки $1, 2, 3, 4$ для управления карбюратором и установкой для опережения вспышки.

Концентрическим расположением всех подвижных частей достигнута высокая чувствительность измерений. Для чувствительности существенно также положение центра тяжести вращающейся системы, которое оказывается различным, в зависимости от типа установленного на станок мотора. Так как вал мотора должен приходиться на одной высоте с валом W , то высота установки мотора является определенной и приходится подгонять подходящую высоту центра тяжести, в случае необходимости, помощью специальных грузов. Дутье пропеллера не должно оказывать на самый испытательный станок никакого действия. Воздействие же его на части мотора входит в измерение, и, например, в качестве тяги измеряется не самая тяга пропеллера, а эта тяга за вычетом реакции на мотор. При измерении принимается во внимание то обстоятельство, что речь идет об определении суммарного действия всех частей конструкции; поэтому необходимо заботиться, чтобы реакция фактически соответствовала практически получаемой в полете.

Реакция выхлопных газов развивает значительные силы; для чистого измерения полезного вращающего момента и тягового усилия, направление выхлопа должно быть перпендикулярным к валу W и лежать с ним в одной плоскости.

§ 101. Электрическая нагрузка; уничтожение электрической энергии. Наиболее удобно измеряют нагрузку электрическим способом, заставляя силовую машину работать на генератор или приводя в движение рабочую машину от электромотора.

Измерение электрической мощности рассматривать не будем. Мы ограничимся упоминанием, что при постоянном токе измеряют силу тока I и напряжение E и исчисляют мощность или в ваттах $N = EI$ (вт) или $= \frac{1}{1000} IE$ (квт).

При трехфазном токе в формулу входит еще коэффициент мощности, косинус φ . В этом случае лучше прямо употреблять измеритель мощности (ваттметр); их нужно применять два, включая их по схеме Арона и складывая их показания; если измерения производят только на одной фазе, то показания ваттметра нужно умножить на $\sqrt{3} = 1,73$; таким образом получается $N = \frac{1}{1000} I \cdot E \cdot \cos \varphi \sqrt{3}$ квт (Л.).

Если хотят знать мощность на соединительной муфте, то должен быть известен коэффициент полезного действия электрической машины или необходимо знать потери в электрической машине, которые при генераторе прибавляются к измеренной нагрузке, а при моторе — вычитаются. Необходимо обращать внимание на то, чтобы расход энергии динамовозбуждения, регулирующего реостата и аналогичных вспомогательных устройств был учтен как потеря и был приведен в соответствие с результатами измерения.

Когда энергия с целью ее измерения, превращена в электрическую форму, она должна быть уничтожена, если не может быть использована для зарядки аккумуляторной батареи или в осветительной сети. Однако и в том случае, когда имеются возможности подобного полезного использования, все же приходится уничтожать часть энергии, чтобы иметь возможность регулировать нагрузку и поддерживать ее постоянной.

Уничтожение части энергии в сущности представляет только превращение в какую-либо бесполезную форму энергии, большей частью тепловую, что производится реостатами. Последние могут состоять из металлических сопротивлений, батарей из ламп накаливания или из водяных сопротивлений.

Металлические сопротивления можно временно устраивать из спиралей из железной проволоки. Им необходимо придавать такие размеры, чтобы они имели определенное сопротивление, которое получается в омах, как частное от деления напряжения в вольтах на силу тока в амперах. Кроме того, поверхность проволоки должна быть достаточно велика, чтобы отдавать развиваемое тепло, не повышая чрезмерно температуру. Нихромовая проволока имеет удельное сопротивление $1,1 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ и выносит высокие температуры. При железной проволоке сопротивление получается по формуле $W = l/10d^2$, при мангане $W = l/1,8d^2$; один квадратный метр излучающей поверхности может рассеивать около $7,5 \text{ квт}$, при хорошей вентиляции значительно больше, при неблагоприятных условиях — меньше. Включают параллельно столько спиралей, сколько могут пропустить требуемую силу тока, и регулируют нагрузку путем выключения отдельных спиралей. Если сопротивления монтированы правильно, их можно безопасно доводить до красного каления. Вполне практичной является установка введения железной горизонтальной трубы, обернутой асбестом, на которую навешивают железные проволочные спирали с широкими витками.

Ламповые реостаты применяются редко. Последовательно включается количество ламп, соответствующее наличному напряжению. Включают параллельно столько серий, чтобы была достигнута требуемая сила тока.

Водяные реостаты (Л.) удобнее проволочных, которые при больших мощностях становятся громоздкими; водяной реостат также проще устроить. Железные листы погружаются в воду, в которой в случае надобности растворяется немного соды, чтобы уменьшить сопротивление. Расстояние между пластинами должно возрастать при увеличении напряжения, а величина поверх-

ности пластин — вместе с силой тока. Ряд пластин устанавливается параллельно друг другу в желобки деревянного корыта или лучше укрепляется на поперечинах из углового железа, которые (поперечины) опираются на края корыта и соединяют пластины попеременно с обоими полюсами. Таким образом используются обе поверхности каждой пластины за исключением крайних. При случайных единичных измерениях можно воспользоваться большой бочкой из-под нефти, в которой одно дно вынуто и в которую опускают пачку железных листов, укрепленную, как показано на рис. 268, в деревянной раме; последняя, скользя по краям бочки, одновременно направляет и центрирует всю пачку при опускании и подъеме. Для трехфазного тока требуется три таких бочки; от каждой из них один ряд пластин присоединяется к центральной точке звезды, а другой — к одной из трех фаз (рис. 269). При напряжении в 220 в между фазами и следовательно $220 : \sqrt{3} = 127$ в между соседними пластинами, сопротивление, при указанных на рис. 268 размерах, оказывается достаточным и удобным для токов до 640 а в каждой фазе, и соответственно для нагрузки до 240 квт

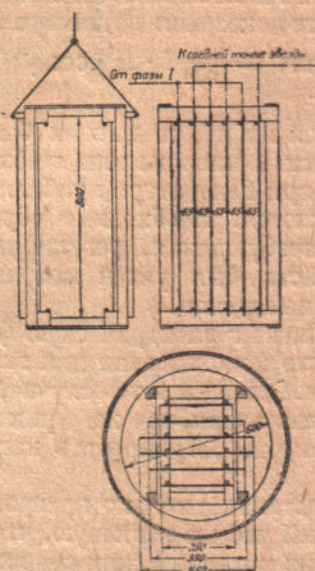


Рис. 268. Комплект пластин из рис. 267 для 127 в × 650 а.

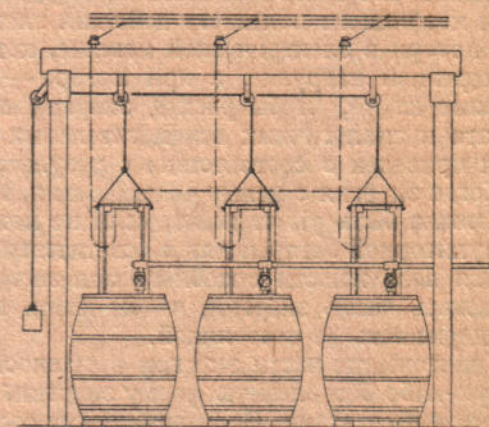


Рис. 269. Нагрузочное водяное сопротивление для трехфазного тока.

в трех бочках. Добавка воды (по 1 м³ в час на каждую бочку) служит лишь для замены испарившейся воды и для того, чтобы не позволять испарению переходить в кипение. Таким образом, на каждый квадратный метр приходится от 350 до 500 а, т. е. для такой силы тока необходимо по одному квадратному метру положительной и отрицательной пластины, а так как используются обе стороны каждой пластины, то в расчет входит каждая сторона в отдельности. Одна пластинка размерами 50 × 100 см может, если используются обе стороны, проводить ток от 350 до 500 а. Для регулирования силы тока, пластины могут подниматься из воды, насколько потребуется. Еще удобнее можно регулировать ток путем изменения концентрации содового раствора; если добавить соды, сила тока возрастает.

Другой такой водяной реостат состоит из 3 деревянных корыт площадью 1000 × 2000 мм в свету, при 1000 мм высоты. Шесть пластин были из трехмиллиметрового железа, 600 мм ширины и 1000 мм высоты; три из них посредством балки, проходившей над всеми тремя корытами, были подвешены к подъемнику, три других, как соединенные с центром звезды, были заземлены и могли передвигаться в горизонтальном направлении; за ними была подведена вода, которая бралась из распределительного желоба градири и обратно сливалась в ее воронку. Корыта и подводящие пластины были, естественно, изолированы. При помощи такого сопротивления можно было поглощать энергию трехфазного тока до 6000 квт при 6000 в; при 4000 квт расстояние между парами пластины было 1330 мм и подводящие пластины погружались на 360 мм в воду; вода имела

от 30 до 40 немецких градусов жесткости и ее подводилось 100 м^3 в час; так как $4000 \text{ квт} = 3400000 \text{ ккал/час}$, то вода нагревалась на 34° С . Как автор имел случай наблюдать, такие сопротивления работали хорошо. Так как пластины имели поверхность в $0,65 \text{ м}^2$, считая с одной стороны, то передача энергии порядка рядка $5200000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ будет неудобной, так как пластины будут весьма горячи (Брун-Бовери).

Едва ли возможно избежать неравномерности в нагрузке различных фаз особенно с водяными реостатами. Для достижения равномерной нагрузки, хорошо включить амперметр во все фазы. Гарантии относительно коэффициента полезного действия относятся обыкновенно к определенному сдвигу фаз, большей частью к $\cos \varphi = 0,8$. Водяные сопротивления не дают никакого сдвига фаз. Поэтому целесообразно включать параллельно электромотор соответственной величины, который на холостом ходу имеет очень большой сдвиг фаз. Впрочем при высоких значениях косинуса φ , его изменения вызывают лишь незначительные изменения коэффициента полезного действия генератора, приблизительно, 1% при переходе от $\cos \varphi = 0,8$ к $\cos \varphi = 1$ и при том коэффициент полезного действия повышается. Таким образом, приемочное испытание силовой машины нагрузкой генератором с $\cos \varphi = 1$ означает некоторое послабление приемщика поставщику.

§ 102. Определение силы и вращающего момента из уравнений ускорения, особенно для определения собственных потерь. Силы могут быть найдены из обыкновенных уравнений ускорения, при помощи определения путей s , пройденных телом в различные моменты времени t . Беря производную, получаем скорость $ds/dt = v$, которую в известных случаях можно определять непосредственно; беря производную v по t , получаем ускорение $dv/dt = a$, из которого можно получить общую, действующую на тело силу P , умножая ускорение на массу тела $m = G/g = G/9,81$. Сила $P = m \cdot a$.

Таким образом, можно определить тяговое усилие, развиваемое паровозом при трогании с места, принимая во внимание, конечно, сопротивление поезда. Так как последнее неизвестно, то предварительно нужно определить эти силы сопротивления по замедлению поезда на горизонтальном участке после закрытия пара (*испытания движением по инерции*).

Чаще, чем силу при поступательном движении, определяют этим путем вращающий момент при вращательном движении. Наблюдая углы поворота φ , сделанные за некоторый промежуток времени t и беря производные от полученных отношений, можно найти угловую скорость $d\varphi/dt = \omega$; выражение $\omega/2\pi$ рад/сек может быть пересчитано на число оборотов, которое при случае может быть определено непосредственно при помощи тахометра. Беря производную ω по t , получаем угловое ускорение $d\omega/dt$, из которого можно получить действующий на вращающиеся массы вращающий момент M_d , умножая это ускорение на момент инерции I_m этих масс относительно оси вращения. Таким образом, получается $M_d = I_m \frac{d\omega}{dt}$.

При подобных исследованиях в каждом случае приходится иметь дело с дифференцированием величин, которые или записаны механически или построены по точкам, на основании числовых данных. Кроме того, при поступательном движении, масса тел определяется простым взвешиванием, а при вращательном движении момент инерции вращающихся масс определяется по формуле $I_m = \int dm \cdot r^2$, где r есть расстояние элемента массы dm от оси вращения. Необходимо также помнить о том, что здесь идет речь о массе m , а не о весе G . Масса и вес связаны соотношением $G = gm$ или $G = 9,81 m$, откуда $I_m = \int \frac{dG}{g} \cdot r^2$.

Определение момента инерции можно производить вычислением, разбивая вращающийся профиль на слои и определяя величину $\frac{G}{g} \cdot r^2$ для каждого такого кольцевого слоя. У маховиков, конечно, главная доля в моменте инерции приходится на обод. Интересна возможность определения момента инерции из наблюдений качаний. Продолжительность t_s полного (двойного) качания физического маятника с моментом инерции I_m и весом G , центр тяжести которого отстоит от оси вращения на e (так что при отклонении на 90° от положения

равновесия момент вращения $M = Ge$ будет (при малых отклонениях):

$$t_s = 2\pi \sqrt{\frac{I_m}{G \cdot e}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_m}{M_1}},$$

откуда получается

$$I_m = \frac{t_s^2}{4\pi^2} \cdot G \cdot e = \frac{t_s^2}{4\pi^2} \cdot M_1. \quad (3)$$

Таким образом, определяя период качаний, можно определить момент инерции, так как при этом также определяется G и e или прямо M_1 . Предварительно необходимо обратить выбалансированное колесо в физический маятник, для чего его подвешивают, согласно рис. 270, на опоре из углового или круглого железа; тогда e — непосредственно известно, а G должно быть определено взвешиванием. Исчисленный отсюда по формуле (3) момент инерции будет представлять момент относительно оси подвеса. Чтобы получить момент инерции

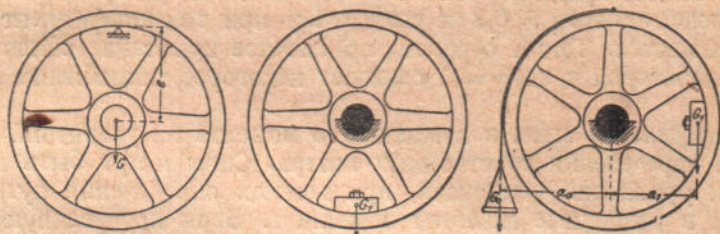


Рис. 270 и 271. Определение моментов инерции из определений качаний (маятниковая проба).

Рис. 272. Определение расстояния центра тяжести добавочной массы.

относительно оси вращения, необходимо полученную величину уменьшить на $\frac{G}{g} \cdot e^2$. Или можно присоединить, согласно рис. 271, добавочную массу эксцентрически, и определить момент M_1 , возникающий при отклонении на 90° , охватывая колесо шнурком и уравновешивая момент груза G_0 (рис. 272). Момент инерции добавочной массы относительно оси вращения, равный приблизительно $\frac{G_1}{g} \cdot a_1^2$, надо вычесть, чтобы получить момент инерции самого колеса в отдельности. Изображенные на рис. 263 и 264 методы, само собою разумеется, применимы только к таким шкивам, которые установлены достаточно подвижно, чтобы дать и при малых амплитудах качаний достаточное число качаний, и поэтому или снабжены шариковыми подшипниками или имеют очень тонкие оси. В обоих случаях для точности расчета существенна точная балансировка шкива. Такая балансировка может быть произведена при помощи вспомогательных грузов, но можно также расчетом устранить влияния недостаточной балансировки, при методе согласно рис. 270 путем повышения в двух диаметрально противоположных точках, а при методе согласно рис. 271 путем применения многих добавочных грузов. Возможны также многие другие устройства для таких исследований времени колебания. Однако, по сравнению с иногда довольно сложными устройствами, часто бывает наиболее удобным определение моментов инерции вычислением.

Пример. Необходимо определить *собственные потери* индукционного тормоза, когда магниты действуют не на маховик машины, но на особый и установленный на особых подшипниках шкив. Сопротивления в подшипниках и шкива в окружающем воздухе необходимо добавить к мощности, измеренной на тормозе, чтобы получить полную тормозную мощность исследуемой силовой машины.

Для определения момента инерции на шкив, установленный на шариковых подшипниках, был укреплен, согласно рис. 271, добавочный груз в 10,20 кг. Он дал длительность 10 колебаний в 82,0 сек, откуда $t_s = 8,2$ сек. При уравновешении, согласно рис. 272, уравновешивающий груз в 6,660 кг почти позволяет колесу поворачиваться назад, тогда как груз 6,700 кг, преодолевая сопротив-

ление трения в подшипниках, начинает поворачивать колесо вперед. Таким образом, груз, необходимый для уравновешения при свободных от трения подшипниках, будет равен $6,68 \text{ кг}$, и действует на плечо: радиус шкива плюс половина толщины шнура $= 0,500 + 0,0005 \sim 0,500 \text{ м}$; отсюда получается момент $M_1 = 6,68 \cdot 0,5 = 3,34 \text{ м} \cdot \text{кг}$ а расстояние центра тяжести добавочного груза $a_1 = \frac{3,34}{10,2} = 0,328 \text{ м}$. Момент инерции шкива, включая и добавочный груз, будет $J + J' = \frac{8,20^2}{4\pi^2} \cdot 3,34 = 5,71$; для добавочного груза $J' \sim \frac{10,2}{9,81} \cdot 0,328^2 = 0,112$; момент инерции одного шкива отдельно будет $J = 5,60 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^2$; наименование вытекает из размерности момента инерции.

Затем для производства испытания движением по инерции, шкив с убранным тормозом и отсоединенной силовой машиной был приведен во вращение с наивысшим для исследуемого случая числом оборотов, и затем предоставлен

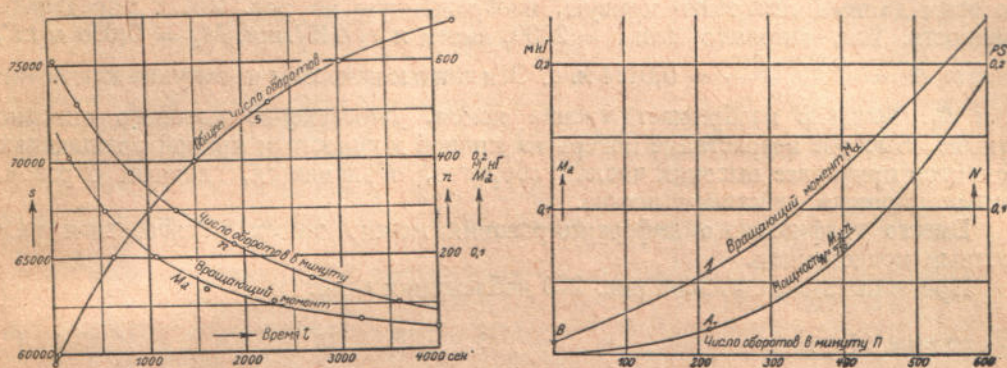


Рис. 273 — 274. Результаты одного испытания на замедление.

самому себе. Так как шкив лежит на шариковых подшипниках, то он вращается долго. Когда счетчик показывал 59 500, был нажат секундомер; затем были произведены как по счетчику, так и по секундомеру отсчеты, которые обозначены на рис. 273 кружками, и по ним построена кривая s . По этой кривой при помощи дериатора были взяты производные между двух точек, например, при $t = 1900 \text{ сек}$; наклон кривой здесь оказался равным $37,0^\circ$, таблица дает $\text{tg } 37,0^\circ = 0,7535 = ds/dt$; какая угловая скорость отвечает этому наклону, зависит от произвольно выбранного при построении кривой масштаба; этот масштаб для кривой s составляет 300 оборотов $= 1 \text{ мм}$ и 60 сек $= 1 \text{ мм}$.

Деля оба равенства, получаем $\frac{300 \text{ об}}{60 \text{ сек}} = 1$; $5 \text{ об/сек} = 1$ или число оборотов $= 300/\text{мин} = 1$.

Так как 1 представляет собой тангенс 45° , то наклон кривой в 45° отвечает числу оборотов $300/\text{мин}$; вообще же для получения числа оборотов нужно помножить тангенс угла наклона на 300. Для $t = 1900 \text{ сек}$, $n = 0,7535 \cdot 300 = 226,0/\text{мин}$. Эта точка вместе с другими, определенными таким же образом, дает кривую n , которая изображает уменьшение числа оборотов в минуту или угловой скорости.

Выбор масштаба для построения кривой числа оборотов является произвольным; можно, например, просто откладывать полученные значения производных, которые получаются в абсолютных числах, и отсюда определить масштаб.

Беря еще раз производную, теперь по кривой n , опять между двумя ее точками, мы по полученным данным можем построить третью кривую, которая будет изображать замедления, а при соответствующем выборе масштаба, также и замедляющие моменты. При определении масштаба следует иметь в виду, что в уравнении $M_d = I \frac{d\omega}{dt}$, под ω подразумевается угловая скорость, выраженная в единицах системы MKS (§ 37). Масштабы кривой n такие:

$$600 \text{ об/мин} = 6 \cdot 10,47 \text{ рад/сек} = 50 \text{ мм} \text{ и } 60 \text{ сек} = 1 \text{ мм}.$$

При делении обоих выражений получается

$$\frac{6 \cdot 10,47 \text{ рад/сек}}{60 \text{ сек}} = 50; \quad 0,0209 \frac{\text{рад}}{\text{сек}^2} = 1.$$

При моменте инерции $5,60 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^2$, как это было найдено для этого шкива, ускорению в $d\omega/dt = 0,0209$ отвечает вращающий момент $5 \cdot 60 \cdot 0,0209 = 0,117 \text{ м} \cdot \text{кг}$; этот момент отвечает также тангенсу угла наклона кривой, равному 1. Если, например, для $t = 2300$ дериватор дал отсчет $24,48^\circ$, что дает значение $\text{tg } 24,48^\circ = 0,4553$, то в этот момент времени замедляющий вращающий момент имел величину $0,4553 \cdot 0,117 = 0,0532 \text{ м} \cdot \text{кг}$. Это точка, вместе с другими определенными такими же образом, дает кривую M_d , изображенную на рис. 273.

Взяв на рис. 273 соответствующие друг другу точки кривых M_d и n , можно по этим данным построить кривую, изображенную на рис. 274 и определить мощность. Так, например, для $t = 2000$, имеем $n = 215/\text{мин}$, $M_d = 0,058 \text{ м} \cdot \text{кг}$, отсюда $N = \frac{0,058 \cdot 215}{716} = 0,0174 \text{ л. с.}$ Эти данные нанесены на рисунке как точки A и A_1 . Точка B изображает трение покоя, определение которого описано раньше. Быстрое возрастание потерь на кривой мощности и кривой вращающих моментов при более высоких числах оборотов, объясняется, главным образом, вентиляционным действием шкива.

Вместо графического дифференцирования можно также пользоваться разностным исчислением.

При испытании согласно рис. 273 наблюдения дали:

Для времени t (сек)	=	48	633	1021	1504	
Показания счетчика s (обор)	=	60 000	65 000	67 500	70 000	
Таким образом для сред- него времени	}	t_m (сек)	=	340	827	1262
Число оборотов было n (об/мин)			=	$\frac{5000 \cdot 60}{585} = 513$;	$\frac{2500 \cdot 60}{388} = 387$;	$\frac{2500 \cdot 60}{483} = 311$
Или $\omega = 0,1047 \cdot n$ (рад/сек)	=	53,8	40,5	32,6		
Дальше для среднего времени t_m (сек)	=	—	583	—	1045	
Ускорение было $\frac{d\omega}{dt}$ (рад/сек ²)	=	$\frac{13,3}{487} = 0,0273$;	$\frac{7,9}{435} = 0,0182$		—	
и вращающий момент $5,60 \frac{d\omega}{dt}$ (м·кг)	=	0,153	—	0,012	—	

Эти значения хорошо согласуются с диаграммой рис. 273.

Для единичных значений и там, где нельзя применить дериватор, можно рекомендовать этот способ. Однако, в общем он ведет к цели не быстрее, чем графический; он менее точен и не годится в случае недостаточно правильных кривых. При неточных отсчетах описанный выше графический метод является трудно заменимым, если только разности не изменяются скачкообразно.

Вышеописанные методы предполагают, что момент инерции предварительно определен по методу качаний. Для такого определения момента инерции, очевидно, соответственная вращающаяся часть должна быть снята с машины. Этого можно избежать, и определение момента инерции вращающихся масс соединить с собственно определением сопротивлений при затухающем движении. Для этого производится два таких испытания при различных условиях и из разницы полученных результатов определяются вычислением все желаемые данные. Этот метод применим различными способами и имеет то преимущество, что до крайности сокращается продолжительность собственно экспериментальной части исследования, вследствие чего машина лишь на короткое время выводится из эксплуатации. Между тем при удачном проведении испытания и полной пропра-

ботке результатов его, этот способ может дать обильный цифровой материал. Конкретный пример лучше всего может высветить особенности этого метода двойного испытания затуханием.

Требуется определить собственные потери вращающихся частей турбогенератора. При двух проведенных испытаниях турбина доводилась до $n = 3000/\text{мин}$ с лишним и затем пар выключался при помощи быстродействующего вентиля. При первом испытании турбина была ненагружена, при втором она работала на некоторое внешнее сопротивление, которое во все время испытания до остановки поддерживалось возможно постоянным. Расходуемая на внешнее сопротивление энергия определялась по отсчетам вольтметра и амперметра, а еще лучше ваттметра. Результаты наблюдений представлены графически на рис. 275. Когда тахометр проходил через 3000, 2950... /мин, давались сигналы, а при проходе 3000/мин был пущен в ход секундомер. Соответственно этим числам оборотов замечались по сигналам моменты наблюдения t_1 — для первого и t_2 — для второго испытания, а второй наблюдатель делал в те же моменты отсчеты по ваттметру. Электрическая мощность затем пересчитывалась на вращающийся момент и значения последнего наносились на диаграмму: $M = 973 N_{el}/n$.

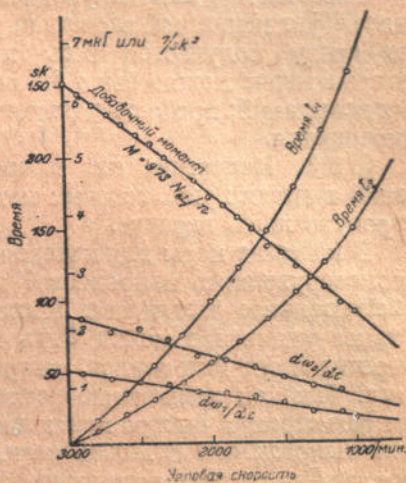


Рис. 275. К методу двойного испытания на замедление.

В первом случае, замедление движения происходило под действием неизвестного и подлежащего определению момента M собственных сопротивлений, согласно отношению $M_1 = I \cdot d\omega_1/dt$. Во втором случае, замедление происходило под влиянием сопротивлений $M_2 = M_1 + M$. Эти сопротивления слагались из такого же момента M_1 собственных сопротивлений и из момента, соответствующего внешней работе изображенного на диаграмме рис. 275 через M . Для момента M_2 существует соотношение $M_2 = I \cdot d\omega_2/dt$. Момент инерции вращающихся масс в обоих случаях постоянен; собственные сопротивления также должны в обоих случаях оставаться действительно одинаковыми. Для этого, например, уже при первом испытании на холостом ходу, устанавливают возбуждение и поддерживают его в течение обоих испытаний одинаковым.

Вычитая одно равенство из другого, получаем

$$M_2 - M_1 = M = I \left(\frac{d\omega_2}{dt} \right) - I \left(\frac{d\omega_1}{dt} \right). \quad (4)$$

Поэтому по рис. 275, беря по кривым производные для моментов t_1 и t_2 , строим кривые $d\omega_1/dt$ и $d\omega_2/dt$. Для каждого произвольно выбранного числа оборотов будет действительно равенство

$$I = \frac{M_2 - M_1}{d\omega_2/dt - d\omega_1/dt}, \quad (5)$$

которое дает момент инерции вращающихся масс

Например, по рис. 275 будет:

для $n = 3000$:	$d\omega_2/dt - d\omega_1/dt = 0,95$;	$M_2 - M_1 = 6,32$;	$I = 6,66$
для $n = 2500$:	$d\omega_2/dt - d\omega_1/dt = 0,81$;	$M_2 - M_1 = 5,35$;	$I = 6,61$
для $n = 2000$:	$d\omega_2/dt - d\omega_1/dt = 0,65$;	$M_2 - M_1 = 4,38$;	$I = 6,74$

Среднее значение $I = 6,67$

Благодаря сглаживающему влиянию графического изображения согласованность полученных значений удовлетворительная, хотя полученные дифферен-

цированием точки и расположились неравномерно. По найденному среднему значению, для $n = 3000$ при $d\omega/dt = 1,31$ получаются искомые собственные потери:

$$M_1 = 6,67 \cdot 1,31 = 8,74 \text{ м} \cdot \text{кг}; \quad N = \frac{8,74 \cdot 3000}{973} = 26,9 \text{ кет.}$$

Когда таким образом определен момент инерции вращающихся масс, можно подобным же образом производить разнообразнейшие другие определения, например, определить влияние на собственные потери различных давлений в корпусе турбины или различных степеней возбуждения.

Определение сил из уравнений ускоренного или замедляющегося движения требует некоторой расчетной работы, но зато имеет то большое преимущество, что сразу получается весь ход зависимостей величин (одна от другой), которые иначе можно было бы получить лишь из очень большого числа отдельных испытаний; продолжительность испытаний таким образом весьма значительно сокращается.

§ 103. Измерение сил в частях строений; сотрясения. Измерение напряжений в частях уже готовых конструкций из стали и камня может быть здесь затронуто лишь вкратце.

В качестве меры для измерения возникающих в частях мостов и в гражданских сооружениях напряжений используются удлинения этих же самых частей; действительное растяжение мостового раскоса является мерой его напряжения и такое удлинение может быть измерено методами, известными из испытаний сопротивления материалов, например, при помощи зеркального прибора Мартенса. Так как применение последнего вне лаборатории неудобно и не годится для регистрации быстро меняющихся усилий, то для этого применяются *измерители напряжений с механическим увеличением*, примерно, до 500-кратного для того, чтобы сделать возможным запись очень малых удлинений, получающихся при измерительной длине 150 мм. Гейгер применяет для этого выполненный в виде весьма легкой решетчатой конструкции угловой рычаг с резервуаром для чернил на оси вращения, так что даже при быстрых движениях чернило не разбрызгивается (Л.). Предназначенный для постоянной нагрузки *акустический измеритель напряжений* предложен Шеффером и состоит в основном из стальной струны около 150 мм длиной, укрепляемой посредством двух зажимов на мостовом бруске и параллельно ему. Эта струна настраивается (путем ее натяжения) в унисон с другой струной, служащей для сравнения. Повышение тона измерительной струны, вызванное удлинением бруска, может быть измерено, так как натяжение струны сравнения может изменяться и одновременно измеряться, пока оба тона опять не совпадут. Такое совпадение легко замечается даже наименее музыкальным наблюдателем по исчезновению биений, возникающих при приближении к унисону. Колебания струн возбуждаются электрически, и звучание их передается также электрически через наушники, благодаря чему с одного места можно производить многочисленные измерения (Л.). Вместо струн можно применять всякий другой метод для измерения весьма малых перемещений, но, конечно, не мессдозу, которая при таких малых перемещениях сама развивала бы весьма значительные собственные силы, а в области производимых измерений силы, развиваемые измерительным прибором, должны быть малы по сравнению с напряжениями в испытываемом бруске. При испытаниях мостов это требование легко исполнимо, но не столь легко исполнимо при испытании стоек и раскосов самолетов. Поэтому из конденсаторной мессдозы (рис. 239) нужно удалить массивную плитку, как воспринимающий орган, и оставить как измерительную часть только конденсаторные пластинки; конденсатор-индикатор (рис. 336) может быть применен непосредственно без переделок, если, конечно, измеряемые усилия не *слишком* малы. Мы приводим эти примеры для того, чтобы показать, что в действительности динамометр, индикатор и упоминаемые приборы для измерения перемещений очень часто приводят к одинаковым конструктивным решениям. Таким образом, вместо конденсаторного устройства можно воспользоваться угольными сопротивлениями, о применении которых для измерения сил говорилось раньше. Для отсчета и записи

сил можно и здесь воспользоваться осциллографом, а при случае и методом половины резонансной кривой. Пьезоэлектрические свойства кварца также могут здесь оказаться полезными.

В Германском исследовательском институте авиации были разработаны два других способа измерения небольших перемещений, чтобы удовлетворить двум взаимно противоположным требованиям — большого увеличения и малой инерции: Кюсснер фотографирует ряд точечных ламп накаливания, укрепленных на крыле самолета, изменение положения которых может быть непосредственно измерено на фотографии. Подробности, касающиеся оптики, можно найти в оригинале (Л.). Пабст разработал способ микрозаписи (*Ritzverfahren* — способ штрихов), при котором движения записываются в *натуральную* величину тончайшими штрихами. Измерение диаграммы производят при помощи измерительного микроскопа. Алмазным острием на твердом стекле можно чертить штрихи от 2 μ толщиной и по ним можно делать отсчеты с точностью до 1 μ ; также диаграммы чертятся до 1 до 2 мм высотой и 25 мм длиной, приборы чрезвычайно компактны и обладают большим собственным числом колебаний. Алмазное острие, при надавливании с силой в 5 г, оказывает сопротивление движению от 1 до 2 г.

Все сказанное относится к измерению сил при последующем испытании для того, чтобы убедиться, что конструкция во всех своих частях удовлетворяет требованиям, предъявляемым к напряжениям, возникающим, например, в мостах, кораблях, самолетах или строительных

сооружениях как в спокойном состоянии, так и при сотрясениях. Здесь всегда речь идет о напряжениях, на которые рассчитано сооружение, и о его надежности. Другая, подлежащая сейчас обсуждению, задача — исследовать путем измерения сотрясения, которые данное сооружение испытывает извне и которые стремятся устранить большей частью вследствие их неприятности; лишь в исключительных случаях эти сотрясения возрастают настолько, что представляют также опасность для сооружения.

Поэтому измерительные приборы в последнем случае не предназначены для измерения *средних* значений возникающих изменений формы и сил, хотя бы потому, что оба эти средние значения равны нулю. Вопрос здесь касается исследования колебаний: их амплитуд, а также и их частот, так как по последним можно судить о наступлении неисправностей. Из разнообразных сюда относящихся приборов (Л.) рис. на 276 указан лишь *виброграф* Гейгера.

Внутри полого шкива *R*, который будучи укреплен при помощи хомута *K* и натяжных клемм *K*₁, стоит неподвижно, находится маятниковый груз *M*, могущий совершать колебания около оси шкива; для этого груз подвешен на двух шариковых подшипниках. Если, ослабив натяжение клеммы, установить барабан в другое положение, можно придать маятнику не вертикальное положение, как изображено на рисунке, но также горизонтальное или установить его косо, вверх или вниз. Каково бы ни было его среднее положение, маятник всегда может совершать колебания около этого среднего положения под действием направляющей силы спиральной пружины. Эти колебания при помощи передачи, аналогичной передаче у динамометра Фиттингера (рис. 259), могут передаваться наружу через полую ось, независимо от положения шкива *R*. Этот нажимной стержень действует на регистрирующий механизм (на рис. не изображенный) с сильным увеличением, в котором применен упомянутый выше пишущий рычаг с резервуаром для чернил в его оси. Таким образом записываются колебания

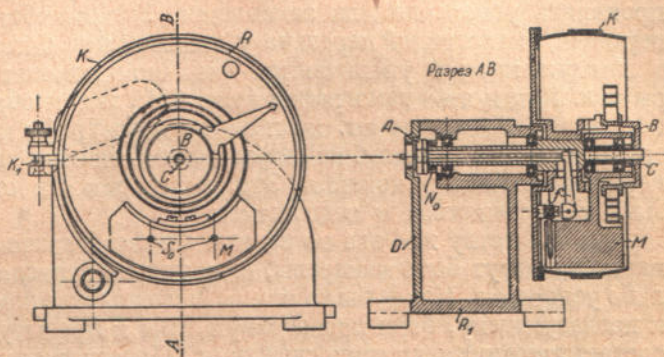


Рис. 276. Виброграф Гейгера.

маятника. Если среднее положение маятникового груза направлено вертикально вниз, как изображено на рисунке, то прибор отвечает на горизонтальные колебания, при горизонтальном же среднем положении, наоборот, — на вертикальные. Каким образом по форме и амплитудам записанных колебаний можно при помощи гармонического анализа судить о характере возбужденных колебаний, здесь не может быть изложено (Л.). Часто, впрочем, удовлетворяются качественной оценкой полученных диаграмм. Собственное число колебаний вибрографов бывает около 400 гц; оно может быть уменьшено в случае необходимости вплоть до 1 гц сменой спиральной пружины и присоединением вспомогательной массы к маятнику.

Виброграф в виде шкива вначале был сконструирован как *торзиограф*. Виброграф может быть превращен в торзиограф, если односторонне лежащую массу маятника заменить кольцеобразной, сбалансированной относительно оси, и удалить со шкива хомут. Шкив тогда используется как выпуклый ременный шкив. Так как колеблющаяся масса остается связанной со шкивом направляющей силой спиральной пружины, то маховое кольцо будет совершать колебания относительно шкива, поскольку последний будет изменять свою скорость или проявлять ускорение или замедление. Эти колебания посредством упомянутой передачи, аналогичной передаче у динамометра Фиттингера, передаются наружу и записываются в увеличенном виде при помощи уже описанного пишущего рычага. Как и при тахографах (рис. 111), таким образом записываются неравномерности в ходе машины, но подобно вибрографу и в противоположность тахографу, средняя скорость не оказывает влияния на показания торзиографа и измеряются только ускорения. Это, в зависимости от цели исследования, может быть и достоинством и недостатком.

По существу же, это во всяком случае безразлично. Все подобные неравномерности могут быть измерены, если только записан либо путь, либо скорость, либо ускорение. Какое бы из них не было вначале измерено, всегда можно перейти к последующему, беря производную, или к предыдущему путем интегрирования соответствующего другого значения. Принципиально можно начинать измерение в любой точке этого пути.

Дальнейшие подробности по измерениям напряжения можно почерпнуть из литературы.

Измерение давления электрическими методами. В последнее время наряду с механическими методами измерения давления широко разрабатываются и с успехом применяются электрические методы.

Механические методы обладают значительной инерцией, поэтому неспособны отмечать быстрые изменения давления. Электрические же методы практически безинерционны, поэтому способны отличать и регистрировать очень быстрые изменения давления.

В настоящее время чаще всего применяются пьезометрический метод, метод индуктивности и метод емкости.

Измерение давления пьезометрическим методом. Явление пьезоэлектричества было открыто в 1880 г. P. et J. Curie; оно заключается в том, что на некоторых кристаллах (кварц, сегнетова соль) при сжатии в определенных направлениях, зависящих от рода кристалла, появляются равные по величине и противоположные по знаку заряды.

При наложении на кристалл, обладающий пьезоэлектрическими свойствами электрического напряжения, кристалл сжимается или расширяется, смотря по знаку наложенного заряда (обратный пьезоэлектрический эффект).

Величина заряда при пьезоэффекте пропорциональна приложенной силе. По снятии нагрузки электрический заряд исчезает.

Для измерения давления лучше всего подходит кварц благодаря высокому модулю упругости и прекрасным изоляционным свойствам. Величина пьезоэлектрического эффекта $10^{-11} \frac{\text{кул}}{\text{кг}}$ достаточна для измерений.

Клуге и Линк (1929 г.) применили пьезоэлектрический метод для измерения давления. Разработанный ими датчик изображен на рис. 277.

Датчик состоит из двух кварцевых цилиндров *k*, сжимаемых в направлении их электрической оси. Одним из электродов датчика является его заземленный корпус, а другим — металлическая пластинка *и*, расположенная между кварцевыми пластинками и тщательно изолированная от корпуса. Кварцевые пластинки расположены так, чтобы их заряды складывались.

Измерение зарядов лучше всего производить электростатическими приборами. Величина напряжения будет определяться емкостью прибора и схемы и величиной возникшего заряда.

Для повышения чувствительности метода выгодно брать электрометр малой емкости, поэтому наиболее подходящим оказался струнный электрометр (емкость 2—5 см).

Для измерения быстропеременных давлений струнный электрометр мало пригоден вследствие малой собственной частоты. Для измерения быстропеременных колебаний применялся электронный осциллограф или шлейфовый с усилением.

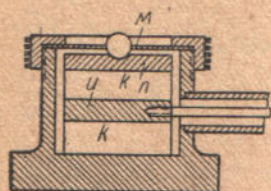


Рис. 277. Конструкция пьезоэлектрического датчика.

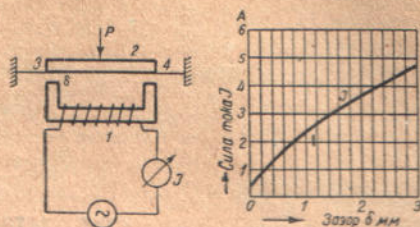


Рис. 278. Схема измерения давления индуктивным методом.

Чувствительность метода велика. Шлейфовый осциллограф (собственная частота шлейфа 2000 гц, чувствительность $10 \frac{\text{мм}}{\mu\text{А}}$ дает отклонение луча на 10... 20 мм по 1 кГ нагрузки).

Измерение давления индуктивным методом. Принцип метода. Реактивная катушка 1 с якорем 2 включается в цепь переменного тока постоянного напряжения и частоты. Якорь поддерживается двумя пружинами 3 и 4. Если якорь прогнется под действием силы P , то изменится самоиндукция цепи из-за изменения зазора δ и сила тока уменьшится. Зависимость между силой тока и измеряемым усилием изображена на рис. 278.

В таком виде прибор обладает рядом существенных недостатков. Показания зависят от частоты и напряжения переменного тока. Использование шкалы амперметра далеко не полно.

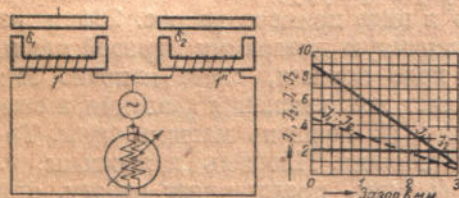


Рис. 279. Схема из двух реактивных катушек с логометром в качестве указателя

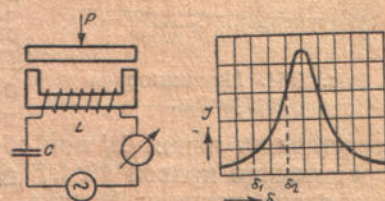


Рис. 280. Схема для измерения давления по методу резонансной кривой («ЭТИ»).

Значительно лучший результат дает применение двойной катушки. Оба сердечника жестко соединены между собой и на каждом находится своя обмотка. Между сердечником расположен якорь, который при действии измеряемой силы перемещается так, что один из зазоров увеличивается, а другой уменьшается. Благодаря этому эффективность действия удваивается. Измерение можно производить с помощью логометра. Более чувствительным методом будет схема моста переменного тока с нуль-гальванометром постоянного тока (ток в цепи гальванометра выпрямляется при помощи мостозаписного выпрямителя).

Если чувствительность нуль-прибора все таки недостаточна, то можно включить в диагональ-моста усилитель тока.

Недостатком неравновесного моста является зависимость от напряжения; только в случае применения равновесного моста, когда ток в нуль-приборе отсутствует, показания будут независимы от напряжения.

Если нужна очень большая чувствительность, то пользуются методом половины резонансной кривой. При увеличении зазора коэффициент самоиндукции катушки уменьшается.

При некотором значении самоиндукции, определяемом величиной емкости C , в контуре наступает резонанс. Чтобы не получить многозначных показаний, пользуются только частью резонансной кривой (откуда и название метода). Показания прямо пропорциональны напряжению и сильно зависят от частоты.

Чувствительность метода удовлетворительна. На практике работают приборы с полным перемещением якоря 0,01 мм.

Такой прибор способен отмечать и регистрировать очень малые деформации, например, в частях сооружений. (Ред.).