# IX. ИНДИКАТОР

**§ 104. Диаграмма хода поршня. Индикаторная и эффективная мощность.** современной употребительной форме индикатор представляет собою самопишущий измеритель давления, который изображает графически возникающие в цилиндре поршневой машины давления, большею частью в функции пути, проходимом поршнем соответствующей машины. Полученная таким образом диаграмма, называемая *индикаторной диаграммой*, позволяет непосредственно определять мощность машины. Так как поршень машины движется взад и вперед и так как всегда повторяется одна и та же смена давлений, то диаграмма представляет собою замкнутую фигуру; она часто имеет форму, приведенную в виде примера на рис. 281 и изображающую типичную диаграмму паровой машины. При прямом ходе поршня, слева направо, линия *abc* представляет ход изменения давления, а отсюда и действующие на поршень машины силы. То же представляет линия *def* при обратном ходе поршня. Площадь диаграммы, т. е. ограниченная кривой *abcdef* поверхность фигуры, представляет работу, отданную паром поршня. Именно, когда поршень при прямом ходе передвигается от $x$ к $x_1$, на него действует сила, уменьшающаяся от $xz$ до $x_1z_1$ и пар, следовательно, отдает ему работу $xzz\,x_1$. Когда поршень, при обратном ходе, движется от $x_1$ к $x$, на него действует сила $x_1y_1 = xy$; однако, в этом случае сила действует навстречу движению, и поршень должен затрачивать работу, а именно выдавливать пар наружу в выхлопную трубу и теперь поршень отдает обратно работу $x_1y_1xy$. Таким образом, площадь $zz_1y_1y$ изображает остающуюся работу, которую работающая среда отдает поршню на участке пути $xx_1$ или при рабочей машине, например, насоса, от поршня получает. Если представить себе всю диаграмму, разделенной на такие узкие полоски, то можно видеть, что полная площадь диаграммы представляет всю работу, переданную паром поршню за один ход.

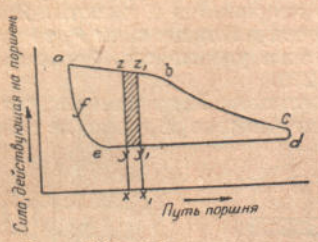


Рис. 281. Индикаторная диаграмма.

При паровой машине индикатор определяет мощность, переданную паром поршню машины; тормозной нажим, надетый на маховик машины, измеряет мощность, которую можно использовать на валу. Последняя мощность будет меньше на величину работы трения и подобных источников потерь. Поэтому мощность, определенную при помощи индикатора, называют индикаторной мощностью $N_i$, а мощность, которую можно использовать на валу машины, *эффективной* или также *тормозной мощностью* $N_e$ паровой машины. Из $N_i = 200$ *л. с.* и $N_e = 170$ *л. с.* получается коэфициент полезного действия $\eta = 0{,}85$; способ обозначения $N = 200$ $HP_e$ и $N = 170$ $HP_e$ теперь оставлен и вполне основательно, так как лошадиная сила всегда одинакова и только измеряет различные величины.

При поршневом насосе индикатор определяет мощность, переданную поршнем воде; на рабочий вал насоса надо передать мощность, увеличенную на потери от трения, и которую можно измерить посредством приводного динамометра (§ 99). Первая называется *индикаторной мощностью* насоса, мощность же, передаваемая на вал насоса, не имеет определенного наименования: ее

называют рабочей мощностью, мощностью на валу, приводной мощностью. Под *эффективной* же *мощностью* насоса подразумевается полезная мощность, которая представляет произведение секундного количества подаваемой воды на высоту подачи (это произведение делится на 102, если хотят выразить мощность в киловаттах).

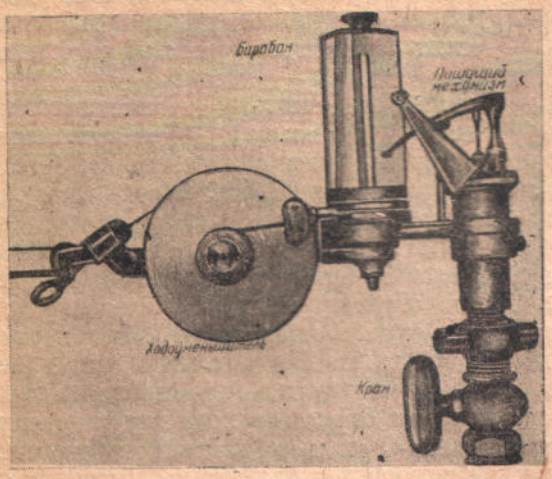



Рис. 282. Индикатор с горячей пружиной.

Рис. 283. Пишущий механизм с поршнем.

**§ 105. Конструктивные формы индикаторов**. Рис. 282—296 представляют несколько весьма употребительных типов индикаторов. Индикатор состоит из маленького, присоединяемого к испытуемой машине цилиндра. В нем ходит плотно пришлифованный поршень и приводит в действие посредством рычажной передачи пишущий штифт, который чертит на барабане, вращающемся вокруг оси, диаграмму. Силы, возникающие от давления на поршень индикатора, измеряются посредством двухходовой спиральной пружины, которая с одной стороны связана с поршнем или поршневым стрежнем, а с другой — с крышкой индикаторного цилиндра. При хорошем изготовлении измерительной пружины отклонения поршня будут *пропорциональны* давлениям. Эти отклонения посредством рычажной передачи к пишущему устройству также *пропорционально* увеличиваются, большей частью в шесть раз. Такие рычажные передачи устраиваются таким образом, чтобы пишущий штифт двигался *прямолинейно* и *параллельно оси* индикаторного цилиндра, поэтому пишущий штифт наносит вертикально на барабан давления в индикаторном цилиндре, которые должны быть одинаковы с давлениями в цилиндре машины, если, конечно, все движения свободны от трения и сами по себе происходят достаточно медленно, так что можно пренебречь влиянием инерции движущихся масс.

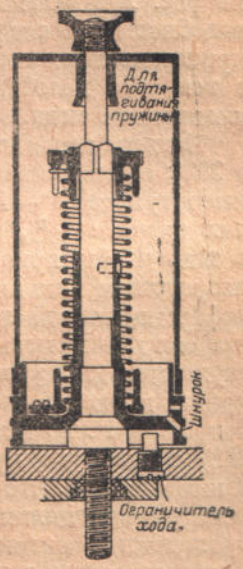



Рис. 284. Барабан, $^1/_2$ натур. величины.

При неподвижном барабане пишущий штифт движется вверх и вниз вдоль одной из его образующих и чертит вертикальную прямую на бумаге, которую натягивают на барабан при помощи двух нажимных пружин. Но сам барабан вращается попеременно возвратным движением. В бороздке, идущей вокруг нижнего конца барабана, лежит шнурок, который через дырочку пропущен внутрь барабана. Шнурок не выдергивается, так как на его конце имеется узелок. Другой свободный конец шнурка связывается с частью машины, совершающей связанное с поршнем машины движение, большей частью с крейцкопфом машины. Шнурок посредством винтовой пружины внутри барабана держится в натянутом состоянии (рис. 284). Упоры,

ограничивающие ход, предоставляют барабану возможность вращения несколько меньше, чем на 360°.

Благодаря совместному действию этих двух движений пишущего штифта и барабана и вычерчивается диаграмма. Очерченная площадь, как уже было указано, и является мерой работы, доставленной за один оборот машины соответственной стороной поршня. Она может быть определена при помощи планиметра (§ 23).

Если ход машины больше, чем свободный охват индикаторного барабана, то путь поршня пропорционально уменьшается посредством *ходоуменьшителя*, который большей частью непосредственно соединен с индикатором (рис. 282). Он имеет два блока различных диаметров на общей оси. Шнурок, идущий от крейцкопфа, охватывает большой блок, конец его пропускается через дырочку, где он и закрепляется. Подобным же образом укрепленный на малом блоке шнурок идет к барабану индикатора и приводит его во вращение. Таким образом, движение барабана определяется отношением диаметров обоих блоков. Плоская спиральная пружина внутри большого блока служит для обратного хода; но она может быть опущена, если пружина барабана достаточна для обеспечения обратного хода ходоуменьшителя. На ходоуменьшителе также, как и на самом индикаторе, имеется направляющее устройство для шнура, которое позволяет отводить шнурок по любому направлению в пространстве. В крейцкопфный шнурок включается резиновое кольцо таким образом, чтобы шнурки, идущие к ходоуменьшителю и к барабану, никогда не оставались бы свободными, но всегда были бы несколько натянуты и в том случае, когда ходоуменьшитель снимают с крейцкопфа, иначе они могут запутаться.

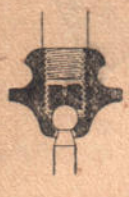


Рис. 285. Шаровой шарнир между поршнем и пишущим механизмом.

Такие роликовые ходоуменьшители устраиваются и для отдельной их установки, с укреплением их на какой-нибудь стоящей перед индикатором машинной части, на гайках или иначе. Такая установка ходоуменьшителя устойчивее; на рис. 282 далеко отстоящий ходоуменьшитель легко прогибается и в случае надобности его следует подпереть. При часто индицируемых машинах, к машине пристраиваются постоянные *рычажные ходоуменьшители*. Необходимо убедиться в том, что подобные ходоуменьшители дают действительно пропорциональное уменьшение хода.

Между индикатором и машиной помещается индикаторный кран (рис. 282 и 288); он ввинчивается в имеющиеся у каждого машинного цилиндра индикаторные штуцера (1″—Витвортовская нарезка для насосов и компрессоров, для прочих случаев — $^3/_4$″) и при постоянном употреблении оставляется при машине с тем, чтобы привинчивать к нему, когда нужно, индикатор — по рис. 286 посредством накидной гайки, при устройствах по рис. 282 и 290, при помощи диференциальной гайки, которая имеет перед предыдущей то преимущество, что она при вращении влево *принудительно* освобождает конусные поверхности, служащие для уплотнения соединения. Кран представляет род трехходового крана; кроме сквозного отверстия около 10 *мм* диаметром, в пробке имеется боковое в 1 *мм*, которому соответствует такой же ширины отверстие (*о* на рис. 288) в корпусе крана. Пробка крана может поворачиваться только на 90° таким образом, что или сквозное широкое отверстие соединяет индикатор с индицируемым цилиндром, причем малое отверстие закрыто, или внутреннее пространство индикатора разобщено от цилиндра машины и соединено через малое отверстие с атмосферой. В последнем случае пишущий штифт индикатора находится в положении покоя и на диаграммной бумаге можно провести горизонтальную прямую, *атмосферную линию*, как начальную для измерения давлений. Это делается на каждой диаграмме, хотя, согласно выводов в предыдущем параграфе, для определения работы положение диаграммы относительно атмосферной линии не имеет значения, так как для такого определения имеет значение только величина поверхности диаграммы. Не имеет она значения и при определении затраченной работы, так как при вакууме площадь диаграммы, полностью или частично, лежит ниже атмосферной линии.

Для того, чтобы быть уверенным, что над индикаторным поршнем господствует атмосферное давление и в том случае, если поршень имеет неплотности, пространство над поршнем должно соединяться с атмосферой отверстиями достаточной величины. У индикатора Розенкранца отверстия в поворотном кольце служат для того, чтобы отклонять вылетающий пар по направлению, где он не будет мешать (*А* на рис. 290, а также видны и на рис. 282). Такой отвод в атмосферу иногда оказывается слишком малым и прорези (*А* на рис. 286) в этом отношении предпочтительнее.

Измерительную пружину на индикаторе, а на ходоуменьшителе меньший блок, можно *менять* с тем, чтобы в каждом случае диаграмма занимала всю бумагу по длине и ширине — за исключением случая, когда при большем числе оборотов, благодаря инерции движущихся масс предпочтительнее довольствоваться меньшими диаграммами (§ 116). На каждом из меньших блоков ходоуменьшителя выштампован ход машины, до которого этот блок достаточен. На каждой пружине проставлено наивысшее давление, выше которого пружина работать не должна: 5 *кГ* — значит пружина пригодна до 5 *ат*. Кроме того на пружине помечается так называемый *масштаб пружины*; например, пометка 12 *мм* означает, что при изменении давления на 1 *ат* пишущий штифт передвигается на 12 *мм*, т. е. 12 *мм* = 1 *ат*. Сама пружина сжимается при этом на 2 *мм* на каждую атмосферу. Вся высота диаграммы при этой пружине может достигать $5 \times 12 = 60$ *мм*, считая вверх от положения покоя карандаша при атмосферном давлении; к этому нужно добавить еще $\sim 2$ *мм* на возможный вакуум — это даст полную высоту диаграммы около 72 *мм*; почти такую высоту и имеет барабан индикатора.

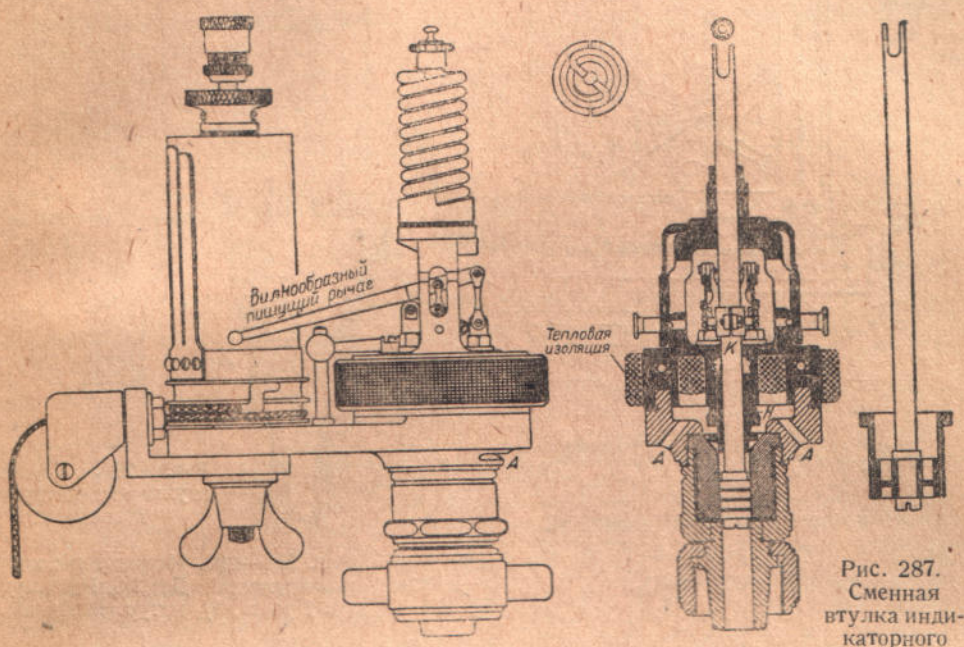



Рис. 286. Индикатор с холодной пружиной, Лемана и Михельса, $^2/_5$ натур. величины.

Рис. 287. Сменная втулка индикаторного цилиндра.

Части, залитые на разрезах черным, относятся к пишущему устройству и могут сниматься с индикатора целиком (рис. 283). Крышка может привинчиваться к индикатору или соединяться с ним на подобие орудийного затвора, для чего в теле индикатора и на крышке винтовая резьба оставлена частично, а в промежутках срезана так, что поворот крышки только на 60° посредством рукоятки (рис. 288 и 289) позволяет ее свободно вынуть.

Когда крышка укреплена на индикаторе, то все-таки часть пишущего устройства остается в известных границах поворачивающейся для того, чтобы

пишущий штифт можно было отвести от барабана, и надеть на барабан бумагу и чтобы карандаш не писал беспрерывно. Поэтому, рычажный механизм не укрепляется непосредственно на крышке, а на специальном кольце, которое может в крышке поворачиваться; шариковое сочленение делает такое движение возможным (рис. 285, 286, 288). При устройстве, изображенном на рис. 286, пишущий рычаг может поворачиваться на целый оборот кругом. Это весьма удобно,

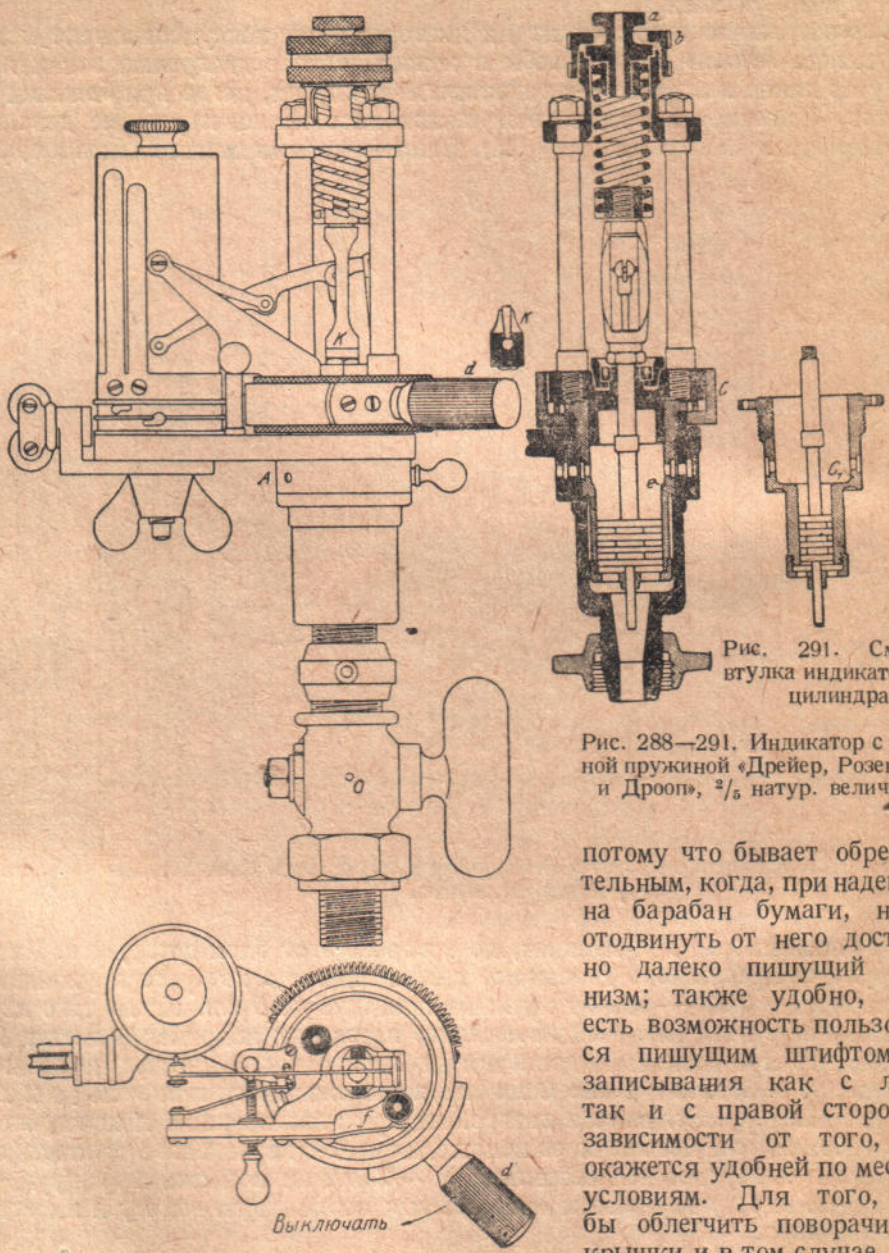



Рис. 291. Сменная втулка индикаторного цилиндра.

Рис. 288—291. Индикатор с холодной пружиной «Дрейер, Розенкранц и Дроон», $^2/_5$ натур. величины.

потому что бывает обременительным, когда, при надевании на барабан бумаги, нельзя отодвинуть от него достаточно далеко пишущий механизм; также удобно, когда есть возможность пользоваться пишущим штифтом для записывания как с левой, так и с правой стороны, в зависимости от того, как окажется удобней по местным условиям. Для того, чтобы облегчить поворачивание крышки и в том случае, когда поршень находится под давлением, между поворотной частью и большой накидной гайкой, которая ее удерживает, вставляется кольцо на шариках (рис. 286).

Измерительная пружина укрепляется на крышке при помощи винтовой резьбы, с поршневым же штоком она соединяется или также нарезкой (рис. 283, 290) или посредством шарика (приваренного к пружине—(рис. 286) который вставляется в прорез поршневого штока и закрепляется сверху гайкой. Последняя конструкция делает ненужной винтовую головку для подвижного конца

пружины и тем уменьшает массу подвижных частей; к этому, как известно (§ 8 и 9), следует стремиться во всяком измерительном приборе. По отвинчивании со штока верхней гайки пружину можно отвинтить от крышки и заменить другой.

На рис. 283 измерительная пружина помещается внутри индикаторного цилиндра; такие *индикаторы с горячей пружиной* вышли из употребления, так как при перегретом паре температура сильно влияет на упругие свойства пружины. В настоящее время больше применяются индикаторы с холодной пружиной (рис. 286, 288), находящейся снаружи; при насосах для холодной воды, а также и при двигателях внутреннего сгорания, с их водяными рубашками, эта разница не имеет значения.

Пришлифованный поршень (рис. 290) изготовлен в виде набора дисков с лабиринтовым уплотнением; он работает не в самом индикаторном цилиндре, а во вставляемой в него *сменной втулке* (рис. 287, 291). Такая втулка омывается и снаружи рабочим веществом, поэтому исключено всякое защемление поршня, так как обогреваемая втулка всегда будет теплее поршня. Преимуществом такой конструкции является также то, что как втулку, так и поршень можно заменить, если они износятся и станут неплотными или повреждены от удара. Кроме того, втулку можно заменить другой, с более узкой расточкой, и пользоваться *меньшим поршнем*; тогда индикатор при пользовании теми же пружинами становится пригодным для более высоких давлений. Нормальный диаметр индикаторного поршня большей частью 20 *мм*, но изготовляются поршни и втулки, у которых площадь поршня составляет определенную дробную часть нормальной площади поршня, например, $^1/_2$, $^1/_5$, $^1/_{10}$; если мы возьмем поршень с площадью, составляющей $^1/_4$ нормальной, с пружиной, масштаб которой — 12 *мм* = = 1 *ат*, то при такой комбинации придется взять масштаб 12 *мм* = 4 *ат* или 3 *мм* = 1 *ат*. В этом случае пружина окажется пригодной не только до 5 *ат*, но и до 5×4 = 20 *ат*, а для такого давления довольно трудно изготовить хорошую пружину нормального габарита. При применении малых поршней, особенно при быстром ходе, легко возникают неприятные влияния движущихся масс, о которых будет речь в § 111 и 114. Отношение между действующими силами и инерцией, которого касались в § 8, в этом случае менее благоприятно.

Втулка ввинчивается сверху (рис. 290) или зажимается между нижней частью индикатора и мостиком, на котором укрепляется барабан (рис. 286). При первой конструкции достаточно снять пишущий механизм, чтобы можно было сменить втулку. Шнуровой привод к барабану остается нетронутым, это преимущество довольно значительно, когда при газовых машинах приходится попеременно снимать многочисленные диаграммы при слабых и сильных пружинах. Последняя конструкция (рис. 286) позволяет пользоваться тем же индикатором и для аммиачного компрессора, для чего нужно только сменить втулку и нижнюю часть индикатора на такие же железные.

Индикатор, который наоборот представляет возможность применять поршни величины *больше нормальной*, будет описан дальше (рис. 312). Он не имеет сменных втулок, но его цилиндр имеет последовательные расточки в 40, 20, а также в 10 *мм*; 40 *мм* поршень употребляется при малых давлениях, с какими приходится иметь дело при индицировании воздуходувок.

Соединение пишущего механизма с поршнем большей частью делается постоянным. При конструкции, изображенной на рис. 286, можно изменять установку пишущего штифта, соответствующую определенному положению поршня, при помощи зажимной муфты *К*. Иногда полезно работать с одной и той же пружиной, один раз от вакуума до 3 *ат* избыточных, а другой раз от атмосферного давленя до 4 *ат* избыточных, если при этом масштаб пружины как раз хватает на 4 атмосферы в целом.

Чтобы предохранить пружины от перегрузки, для поршня должен быть предусмотрен ограничивающий ход упор. Для этого на поршневом штоке (рис. 283 и 290) имеется буртик. На рис. 286 предусмотрена особая переставная муфта, чтобы иметь возможность ограничивать ход до требуемого положения; такое устройство хорошо при снятии диаграмм со слабыми пружинами с газовых машин, но может быть заменено прокладкой дистанционных колец под буртик рис. 290.

Задачей *пишущего механизма*, как уже было упомянуто, является пропорциональное увеличение передвижений поршня, большей частью в шесть раз, причем передвижение пишущего штифта должно направляться по прямой и параллельно оси цилиндра и барабана. Наиболее употребительные рычажные передачи представлены на рис. 292a и 292b. Принцип механизма Томпсона основан на следующем, известном из кинематики, факте. Если одна конечная точка $S$ стрежня передвигается по вертикальной прямой, а другая конечная точка $D$, по горизонтальной, то средняя точка $E$ отрезка $SD$ описывает дугу круга с центром в точке $F$, являющейся точкой пересечения горизонтальной и вертикальной направляющих. Наоборот, если среднюю точку $E$ при помощи направляющего рычага $EF$ направлять по кругу с центром в $F$, в конечную точку $D$ по горизонтальной прямой — приближенно по дуге круга, описываемого концом $D$ направляющей $BD$, то пишущий штифт $S$ будет двигаться по вертикали, которая лишь тогда будет заметно отклоняться от прямой, когда, при больших амплитудах, путь точки $D$ будет сильно отклоняться от горизонтали. Путем удлинения коромысла $BD$ можно достигнуть любого приближения к точному

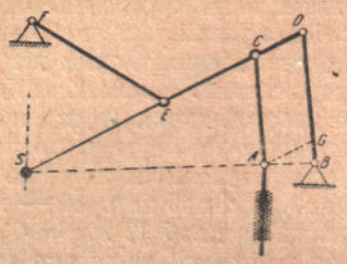


Рис. 292a. Направляющий механизм Томпсона.

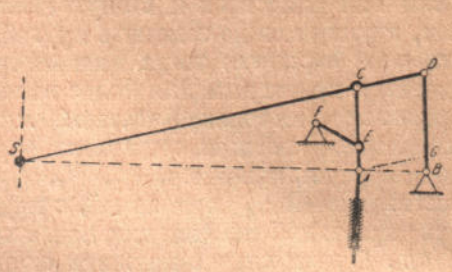


Рис. 292b. Направляющий механизм Кросби.

*прямолинейному направлению*. Механизм Кросби имеет такой же направляющий рычаг и такой же пишущий рычаг $SD$; обратное коромысло $FE$ расположено иначе. Движение любой точки $E$ соединительного стержня $CA$, точка $A$, которого направляется по вертикальной прямой поршнем и поршневым штоком, можно точно определить — графически или вычислением — для случая точно вертикального движения пишущего штифта. Описанную при этом точкой $E$ кривую можно приближенно заменить дугой круга с центром $F$; в известных границах и здесь приближение получается удовлетворительное.

Кроме требования прямолинейного направления необходимо выполнить еще требование пропорциональности между перемещениями поршня и пишущего штифта. Для этого точки $S$, $A$ и $B$ должны лежать на одной прямой и должно быть $SA : AB = SC : DC$. Если это выполнено для одного положения механизма, то оно будет действительно и для любого другого, поскольку $S$ движется прямолинейно и точки $A$ и $S$ движутся параллельно друг другу. Эту схему всегда можно превратить в схему пантографа, начертив соединения $AG$ вместо обратного коромысла, причем получился бы великолепный механизм для индикатора, если бы точки $G$ и $B$ не лежали слишком тесно друг около друга, так что небольшие неточности в работе не обусловливали бы больших погрешностей в движении пишущего штифта. Таким образом, и против механизма Кросби, по сравнению с механизмом Томпсона, можно сделать возражение, что $A$ и $E$ расположены слишком тесно по отношению друг к другу; с другой стороны, конечно, шарнир $E$ Томпсоновского механизма является конструктивно трудным пунктом, а также инерция движущихся масс у Томпсоновского механизма больше.

Для того, чтобы уменьшить влияние движущихся масс и сделать индикатор пригодным для более высокого числа оборотов, *барабан* индикатора следует делать возможно более легким; его и делают из тонкой стальной жести или алюминия. Большой ролик ходоуменьшителя, для которого имеют силу те же соображения, также делается из алюминия.

Винтовая пружина, служащая для возвратного движения барабана, снизу закрепляется в ножке барабана, а сверху в головке, которая надета на ось барабана, имеющей в данном месте четырехугольное сечение. Это мешает поворачиванию головки, но позволяет ее немного подымать и снимать с квадрата для натягивания или ослабления винтовой пружины (рис. 284 и 294, *D*). Для смены диаграммной бумаги барабан нужно остановить, другими словами, отцепить шнур от крейцкопфа. Этот шнур можно совсем снять с крейцкопфа и затем надеть снова. Однако, при высоком числе оборотов это представляет некоторые затруднения. Для этого применяется особый карабин (ловчий крюк, рис. 293). У индикатора с останавливающимся барабаном верхняя часть барабана, на которую надевается бумага, и нижняя, с бороздками для шнура, соединяются вместе лишь тогда, когда требуется, а для остановки разъединяются. Таким образом, шнурки продолжают работать, а самый барабан стоит неподвижно. Согласно рис. 284 можно сидящий наверху барабана винт *Г* повернуть налево, причем барабан подымается и освобождает конусное сцепление со шнуровым блоком. Поворот направо прижимает его опять вниз и включает сцепление. Штифт *С*, верхняя часть которого пружинит, надежно обеспечивает правильную взаимную установку обеих частей барабана для того, чтобы пишущий штифт не скакал по клеммам для зажима бумаги. Давление конусного сцепления воспринимается шариками (под головкой *Г*, рис. 294). Остановочные устройства легко дают на остановках расцепление; при некотором навыке с простым барабаном можно доходить до весьма высоких чисел оборотов.

Рис. 293. Ловительный крюк (карабин) для надевания шнура при высоком числе оборотов.

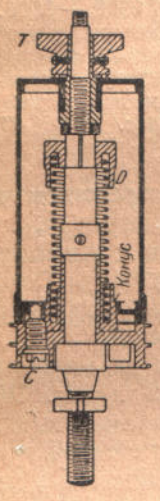



Рис. 294. Барабан с остановкой на холостой ход, фабрики Майгак.

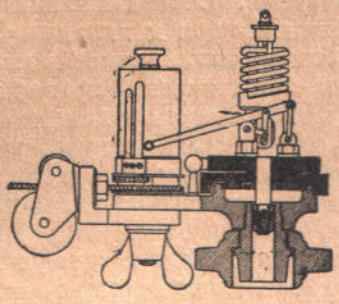


Рис. 295. Индикатор для высокого числа оборотов, фабрики Майгак.

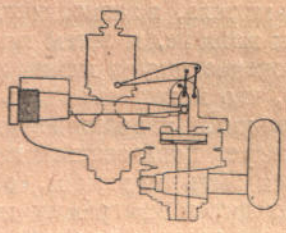


Рис. 296. Индикатор со стержневой пружиной для высокого числа оборотов, фабрики Майгак.

Поверхность *диаграммной бумаги* специально препарируется, так что мягкий металл (серебро, медь или латунь) отчетливо на ней пишет; пишущий штифт представляет тоненький серебряный штифтик в маленькой зажимной муфточке или латунный штифтик с нарезкой, такие металлические штифты снашиваются не так быстро, как обыкновенные карандаши, (которые также иногда употребляются), и кроме того они дают значительно более тонкую линию. Шнур для привода барабана употребляется плетеный, а не крученый, чтобы он по возможности менее растягивался под влиянием постоянно меняющегося, при ходе вперед и назад, натяжения пружины барабана. Он должен быть навощенным, чтобы предотвратить изменения длины под влиянием влажности.

Индикаторы различных конструкций изготовляются *различных величин*; конечно, нормальный диаметр поршня большей частью бывает 20 *мм* (или $^3/_4$″), но при меньших типах нужно в возможно большей степени уменьшить вес движущихся частей как пишущего механизма, так и барабана, путем облегчения и подбора формы всех частей. Уменьшение проходимого пути и массы частей

делает индикатор более пригодным для высоких чисел оборотов, а также для индицирования такого рода машин, в которых наблюдаются особенно быстро протекающие изменения давлений. Как известно из § 8 и как более подробно будет изложено в § 111 и 114, при каждом изменении давления возникают колебания пишущего механизма, которые налагаются на кривую действительного хода давлений. Колебания часто затемняют действительный ход, когда они слишком сильны, и если к тому же собственное число колебаний мало по сравнению с подлежащими исследованию изменениями. Собственное число колебаний можно повысить, уменьшая движущиеся массы. Постановка более жесткой пружины также действует весьма энергично в том же смысле.

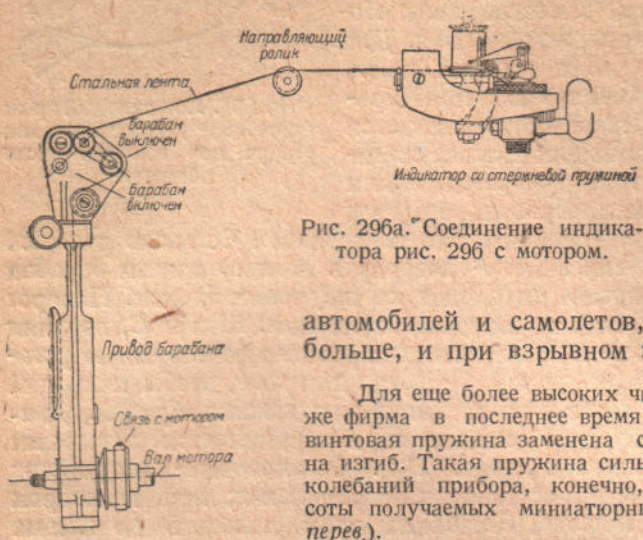



Рис. 296а. Соединение индикатора рис. 296 с мотором.

На рис. 295 показано конструктивное оформление индикатора минимальной величины, который находит применение при моторах автомобилей и самолетов, для чисел оборотов 1200 и больше, и при взрывном зажигании.

Для еще более высоких чисел оборотов, до 2500 — 3000, эта же фирма в последнее время выпустила индикаторы, у которых винтовая пружина заменена стержневой пружиной, работающей на изгиб. Такая пружина сильно повышает частоту собственных колебаний прибора, конечно, за счет понижения общей высоты получаемых миниатюрных диаграмм (рис. 296). (*Прим. перев.*).

**§ 106. Обращение с индикаторами.** Сперва индикатор посредством промежуточной части с краном привинчивается к индикаторному штуцеру, ходоуменьшитель, в зависимости от обстоятельств, прикрепляется или к индикатору или к машине, и затем прилаживается шнуровой привод к барабану. Так как растяжение шнура может вызвать погрешности в диаграммах, следует избегать всего, что может вызывать сильное растяжение шнура, в особенности трения. Маленькими направляющими роликами на ходоуменьшителе и на индикаторе не следует пользоваться для слишком крутого изменения направления. Шнур должен быть коротким, особенно от ходоуменьшителя до барабана; вытяжка его входит в диаграмму неуменьшенной. Там, где шнур надевается на крейцкопф, он должен до этого итти параллельно передвижению крейцкопфа, иначе угол, под которым он отходит от крейцкопфа, будет изменяться при движении вперед и назад, и передвижения барабана не будут пропорциональны передвижению крейцкопфа. Во избежание этого, направление шнура может быть исправлено направляющими роликами, которые, однако, не следует применять без необходимости.

Во многих случаях, именно при дизелях и газовых машинах без отдельного крейцкопфа нет точки с движением вперед и назад, к которой можно было бы присоединить барабан. При частом индицировании следует предусмотреть устройство маленького кривошипного механизма с надлежащим ходом и тем же отношением длины шатуна, как и у главного кривошипа. При случайных индицированиях приходится большей частью довольствоваться тем, что устраивают на конце вала маленький кривошип из изогнутой проволоки (рис. 297). Он ввинчивается на месте керна (в центре вала) и закрепляется контргайкой. Обратный загиб кривошипа к оси вала облегчает надевание шнура при высоком числе оборотов. Правильное положение мертвой точки определятся путем проб: отжимая рычаг зажигания или (при дизельмашине) прекращая впрыскивание горючего, можно остановить вспышку, и тогда, при правильном положении мертвой точки, линия расширения должна совпадать с линией сжатия. Так как при снятии таких диаграмм и от крейцкопфа оказывается, что эти обе линии никогда друг друга полностью не покрывают, то названный способ нахождения мерт-

вой точки применим только по необходимости; он особенно плох тем, что уже при несколько неточной установке мертвой точки площадь диаграммы сильно меняется, особенно у дизель-машины. Кроме того, при применении способа, изображенного на рис. 297, погрешность происходит и от того, что полученное линейное передвижение отвечает весьма длинному (~ бесконечному) шатуну. Если же на соответствующем расстоянии пропустить шнур через очко или роликовое направление, то это опять не будет отвечать постоянной длине шатуна, но будет во всяком случае лучше.

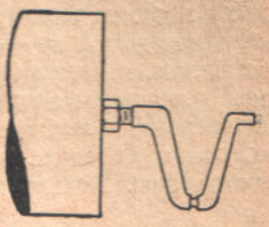


Рис. 297. Вспомогательный кривошип для индикаторного шнура.

Для того, чтобы индицировать обе стороны цилиндра, проводят изогнутую трубку к распределительному крану посередине цилиндра и к этому крану привинчивают индикатор. Таким образом, обе стороны можно индицировать одним индикатором. Такое устройство допустимо только при сравнительно тихоходных машинах. Вследствие сопротивлений в трубах изменения давления в цилиндре машины не могут правильно передаваться в цилиндр индикатора, а возникновение стоячих волн в трубах может давать начало неожиданным явлениям. Поэтому следует предпочитать применение двух индикаторов; точно также отверстия в кранах и в штуцерах машины не должны быть слишком узкими, особенно при индицировании насосов, где присоединяются еще значительные воздействия движущихся масс воды, которые должны входить и выходить из индикатора и получать в узких отверстиях большие скорости.

Большей частью индикатор одного конца цилиндра приводится в движение от ходоуменьшителя, а индикатор другого конца цилиндра — от второй шнуровой бороздки первого индикатора. Включать один за другим еще больше индикаторов таким способом не следует, иначе шнурки слишком сильно натягиваются и часто рвутся. Следует принять за правило,—сперва правильно пустить в ход ролик ходоуменьшителя, затем первый индикатор и, наконец, второй, в том последовательном порядке, как осуществляется передача. Иначе движения последнего барабана будут мешать, когда придется что-нибудь изменять в ходоуменьшителе.

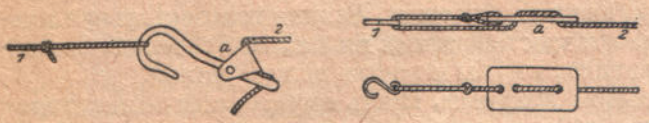


Рис. 298. и 299. Патентованный крюк и шнуровая пряжка, оба—для соединения двух шнуров и установки длины шнура.

Крюк и шнуровая пряжка (рис. 298 и 299) представляет удобное соединение для концов шнура, длину которого при их помощи легко менять. Крюк является подходящим только тогда, когда шнур постоянно натянут, например, между двумя последовательно включенными барабанами; если шнур ослаблен, то соединение может расцепиться.

После установки и затем чаще во время испытания следует проверить, прикладывая палец, не ударяются ли барабан или ходоуменьшитель об ограничивающие ход упоры. Перемена движения в конце хода должна происходить мягко и без толчков. Такие толчки искажают диаграмму, как показывает рис. 300.

После окончательной установки и приведения в порядок шнурового привода вставляется пишущий механизм, снабженный соответствующей пружиной. Поршень индикатора, перед тем как вставить его в цилиндр, смазывают маслом. Прилагаемое к индикатору весьма жидкое индикаторное масло хорошо только для низких температур. При паровых цилиндрах лучше применять машинное масло (олеонафт), при цилиндрах высокого давления машины с перегретым паром оказывает хорошую услугу густое цилиндровое масло, которое при высокой температуре оказывается достаточно жидким. Само собою разумеется, что после употребления для предохранения от ржавчины весь индикатор должен быть тщательно очищен и вытерт, стальные части, пружина и поршневой шток—слегка смазаны.

Чтобы *снять диаграмму*, нужно надеть на барабан бумагу, надеть шнур или включить останавливающее устройство[1] и, при еще закрытом индикаторном кране, провести атмосферную линию. При этом одновременно регулируют установочный винт так, чтобы пишущий штифт чертил только тонкую отчетливую линию для того, чтобы диаграмму можно было точно измерять и чтобы трение пишущего штифта возможно меньше искажало диаграмму. После этого пишущий штифт опять подымают с барабана, открывают индикаторный кран, дают поршню сделать несколько ходов и затем снимают собственно диаграмму — обыкновенно одну — в зависимости же от обстоятельств, а именно при газовых машинах, и несколько сразу, именно потому, что при газовых машинах отдельные диаграммы настолько отличаются друг от друга, что одна диаграмма может значительно отклоняться от средней. Снимают столько диаграмм, чтобы было обеспечено среднее значение, следовательно, тем больше, чем больше разбросаны диаграммы. Большей частью снимают не свыше пяти диаграмм на одном листе, так как иначе трудно проследить каждую в отдельности. По изготовлении диаграммы, на ней всегда отмечается время снятия, которое отмечает надежнее взаимно относящиеся друг к другу диаграммы, чем последовательная нумерация. Затем на первой диаграмме отмечаются получившиеся в дальнейшем изменения, а также на каждой диаграмме масштаб пружины, число оборотов, нагрузка машины и все, что окажется достойным внимания, если числовые данные не будут занесены в особый протокол испытания.

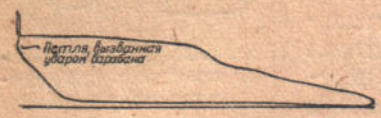


Рис. 300.

Каждая диаграмма после ее снятия должна быть критически рассмотрена в том отношении, был ли индикатор и его привод в порядке, так как диаграмма действительно дает понятия о состоянии, в каком находится *машина*. Так, следует убедиться, что ничто не задерживало поршня. Всякая горизонтальная прямая может вызывать сомнения, так как диаграмма индикатора с легким свободным ходом везде представляет волны, изгибы и другие мелкие детали.

**§ 107. Обработка и вычисление диаграмм.** Пусть вычерченная индикатором диаграмма имеет вид, изображенный на рис. 301. Ее площадь есть мера работы, диаграмма вдвое большей величины означает и вдвое большую работу. Как определить сумму всей работы или вернее, как при помощи дополнительных данных о числе оборотов вычислить мощность машины, — будет изложено дальше.

Частное от деления площади диаграммы $I$ на ее длину $l$ называется ее *средней высотой*: $h_m\ мм = \frac{I\ мм^2}{l\ мм}$.

Если мы хотим заменить диаграмму равновеликим ей прямоугольником той же длины, который представляет равную работу, то такой прямоугольник будет иметь эту высоту $h_m$. Площадь диаграммы измеряется планиметром или по правилу Симпсона. Определяется расстояние между обеими вертикалями, которые восставляются к атмосферной линии так, чтобы они касались концов диаграммы (рис. 301).

Деля среднюю высоту диаграммы на масштаб пружины $m$, мы получаем *среднее индикаторное давление* в цилиндре: $p_i\ ат = \frac{h_m\ мм}{m\ мм/ат}$. Эта величина показывает, насколько в среднем давление в цилиндре было больше при ходе поршня вперед, чем при обратном ходе его. Это среднее взято не по времени, но отнесено к ходу поршня.

Если $F$ обозначает *действующую* площадь поршня машины, $s$ его ход, $n$ его число оборотов (минутное), то $Fp_i$ будет средняя действующая на поршень сила и $Fp_is$ — работа, произведенная за один оборот — прямой и обратный ход — так как $p_i$ есть разница давлений при прямом и обратном ходе. Такая работа в каждую секунду доставляется $n/60$ раз. Отсюда *индтикаторная мощность* для одной стороны цилиндра, как она получается из диаграммы, будет

$$N_i\ квт = \frac{F\ см^2 \cdot p_i\ ат \cdot s\ м \cdot n\ мин^{-1}}{60 \cdot 102}; \qquad (1)$$

Эта формула прямо дает мощность одноцилиндровой, простого действия, машины. При машине двойного действия и многоцилиндровой необходимо определить мощность для каждой стороны цилиндра и для каждого цилиндра и эти отдельные мощности сложить. При двигателях внутреннего сгорания с четырехтактным циклом вспышка происходит только при каждом втором ходе поршня вперед и только четверть полного хода доставляет работу, поэтому в формулу следует подставить $\frac{n}{2}$ вместо $n$; мы будем говорить особо о вычислении четырехтактных диаграмм.

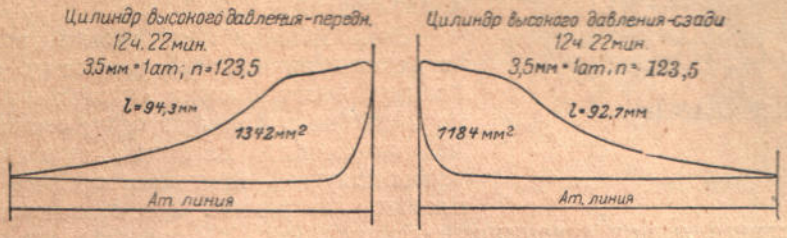



Рис. 301. Диаграмма обеих сторон цилиндра высокого давления сдвоенной паровой машины.

Пример. Для одной машины тройного расширения даны диаграммы переднего и заднего конца цилиндра высокого давления. Размеры цилиндра следующие: диаметр цилиндра 320 *мм*, диаметр поршневого штока (только спереди) 80 *мм*, ход поршня 650 *мм*. На основании сделанных на диаграммах заметок и результатов обмеров получается индикаторная мощность цилиндра высокого давления $N_h = 79{,}0$ *квт* (см. таблицу 19).

Таблица 19

**Вычисление диаграммы одного цилиндра паровой машины**

| | Передняя часть (сторона, обращенная к поршню) | Задняя (со стороны крышки) |
|---|---|---|
| Средняя высота диаграммы $h_m$ *мм* | $\frac{1\,342}{94{,}3}=14{,}24$ | $\frac{1\,184}{92{,}7}=12{,}78$ |
| Среднее индикаторное давление $p_i$ *ат* | $\frac{14{,}24}{3{,}5}=4{,}07$ | $\frac{12{,}78}{3{,}5}=3{,}65$ |
| Действующая площадь поршня $F$ *см*² | $804{,}2-\frac{8{,}0^2\cdot\pi}{4}=753{,}9$ | $\frac{32{,}0^2\cdot\pi}{4}=804{,}2$ |
| Число оборотов $n$/*мин* | 123,5 | 123,5 |
| Ход поршня $s$ *м* | 0,650 | 0,650 |
| Индикаторная мощность $N_i$ *квт* | $\frac{753{,}9\cdot4{,}07\cdot0{,}650\cdot123{,}5}{60\cdot102}=40{,}4$ | $\frac{804{,}2\cdot3{,}65\cdot0{,}650\cdot123{,}5}{60\cdot102}=38{,}6$ |
| | Вместе: $N_h=79{,}0$ *квт* | |

Так как соответственное вычисление дало для цилиндра среднего давления $N_m = 60{,}1$ *квт* и для цилиндра низкого давления $N_n = 81{,}2$ *квт*, то общая мощность получается $N_i = 79{,}0 + 60{,}1 + 81{,}2 = 220{,}3$ *квт*.

$F$ должно обозначать *действующую площадь поршня*. Для ее исчисления форма поршня, например, наличие поршневой гайки (рис. 302 слева) не имеет значения. Действующая площадь поршня есть $\frac{1}{4}D^2\pi$, где $D$ обозначает диаметр *цилиндра*, а не диаметр поршня, который несколько меньше. Но если поршневой шток выходит через сальник наружу (рис. 302 справа), то необходимо вычесть площадь сечения штока, так как на эту площадь $p_i$ не действует, следовательно здесь действующая площадь будет $^1/_4D^2\pi - {}^1/_4d^2\pi$. Площадь поршня таким образом спереди и сзади различна. Диаметр цилиндра у старых машин бывает, благодаря износу, больше, чем показывают рабочие чертежи. Этот диаметр при горячем цилиндре также больше, чем при холодном и должен измеряться по горячему цилиндру. При плунжере действующая площадь поршня будет $^1/_4D^2\pi$, где $D$ — диаметр плунжера.

*Ход машины* только тогда равен двойному радиусу кривошипа, когда нет никакой игры в крейцкопфе и кривошипных подшипниках. Наблюдаются также расхождения в несколько миллиметров между действительным ходом и взятым по рабочим чертежам. При машинах без маховиков, дуплекс-насосах и т. п., длина хода бывает переменной и, например, зависящей от числа ходов. В этих случаях лучше определить отношение длины диаграммы к длине хода прямым измерением, а не по размерам редукционного барабана. Однако и это отношение несколько изменяется вследствие различной степени натяжения шнура при различном числе ходов.

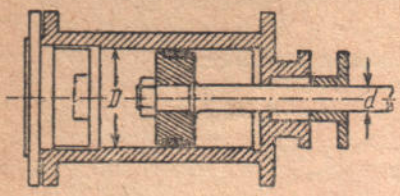


Рис. 302.

Если машина идет весьма равномерно, то достаточно каждый раз снять одну диаграмму. Однако, когда отдельные диаграммы не идентичны, снимают сразу серию, примерно, около пяти диаграмм на одном листке, чтобы получить пригодное среднее значение площади диаграммы. Это обыкновенно имеет место в случае *машин внутреннего сгорания*. Рис. 303 представляет диаграмму газовой машины с пятью отдельными диаграммами. Площадь такой диаграммы определяют, планиметрируя все пять диаграмм один обводом планиметра и, отсчитав полученную таким образом общую площадь, делят ее на пять.

Но диаграмма четырехтактной машины в сущности состоит из двух площадей; узкая нижняя часть лежит по обе стороны атмосферной линии и обводится пишущим штифтом в направлении, обратном верхней так, что вся диаграмма представляет деформированную восьмерку. Обратное направление обвода означает, что эту площадь приходится рассматривать не как доставленную работу, а наоборот, как расход работы. Линии по обеим сторонам атмосферной линии изображают выталкивание сгоревших газов и засасывание свежей смеси,—

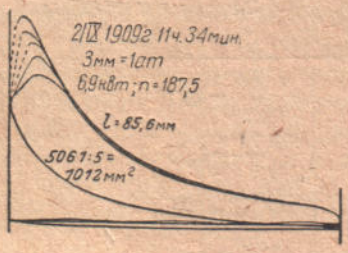


Рис. 303. Серия диаграмм.

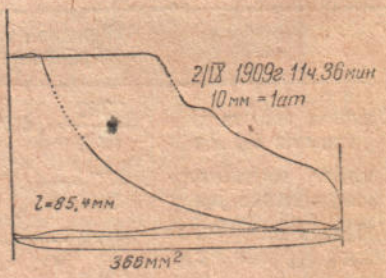


Рис. 304. Диаграмма со слабой пружиной.

Обе от одного четырехтактного двигателя, $^1/_2$ натур. величины.

процессы, которые, естественно, *требуют затраты работы*. Как индикаторную мощность машины следует таким образом рассматривать разницу между работой, доставленной в главной площади диаграммы и работой, затраченной в узкой площади (Л.). При вычислении такой диаграммы будем обводить ее штифтом планиметра точно так же, как она была начерчена пишущим штифтом индикатора, который описывал восьмерку. При этом планиметр сам образует разницу между площадью работы и площадью потерь и по его показаниям можно исчислять мощность так же, как и при паровой машине, учитывая при этом, что эта работа доставляется только при каждом втором обороте и что таким образом при расчете следует принимать $n/2$ вместо $n$. Однако, пятикратный обвод столь узенькой площади утомителен. Кроме того, планиметрирование столь узких площадей ненадежно, так как неточности при обводе могут оказаться больше, чем вся обведенная площадь; к тому же отдельные линии далеко не всегда бывают проведены так отчетливо, как на рис. 303. Поэтому предпочитают снимать кроме главной диаграммы, которую используют только для определения площади *работы*, еще *диаграмму со слабой пружиной* (рис. 304), которая позволяет определить площадь потерь более надежно. Диаграмма со слабой пружиной снимается с пружиной с таким большим масштабом, что на бумаге полностью

умещается только нижняя часть диаграммы, а верхняя отпадает, потому что поршень индикатора упирается в крышку своего цилиндра. Необходимо обращать внимание на то, чтобы толчки в крышку приходились на время постепенно протекающего сжатия, но не на момент вспышки, когда быстрое возрастание давления ведет к сильным ударам. Подъем индикаторного поршня ограничивают, надевая на его шток маленькую гильзу, если индикатор не имеет для этого специального перестанавливаемого ограничения хода.

Пример. На рис. 303 обмер площади работы на пяти снятых диаграммах дал величину в 5061 *мм*²; площадь диаграммы поэтому принимаем 5061 : 5 = = 1012 *мм*², длина диаграммы—85,6 *мм*, примененная с 20 *мм* поршнем пружина имела масштаб 3 *мм* = 1 *ат*. Поэтому $h_{m_1} = \frac{1012}{85,6} = 11,83$ *мм* и $p_{i_1} = \frac{11,83}{3} =$ $= 3,94$ *ат*. На рис. 293 обмер площади потерь один раз снятой диаграммы дал 366 *мм*², длина диаграммы — 85,4 *мм*; применялась пружина с масштабом 10 *мм* = 1 *ат*; следовательно, $h_{m_2} = 4,29$ и $p_{i_2} = 0,429$ *ат*. По обеим диаграммам вместе мы получаем $p_i = 3,94 - 0,429 = 3,51$ *ат* действующего избыточного давления на два оборота; диаметр цилиндра — 250 *мм*, откуда площадь $F = 490,9$ *см*²; ход поршня 450 *мм* или $s = 0,450$ *м*; число оборотов $n = 183,3$/*мин*, поэтому получается

$$N = \frac{\frac{1}{2} \cdot 490,9 \cdot 3,51 \cdot 0,450 \cdot 188,3}{60 \cdot 102} = 12,0 \text{ квт}.$$

Диаграммы должны сниматься со всех пространств, в которых движутся поршни' могущие доставлять работу или поглощать ее при *ступенчатых поршневых насосах*, следовательно и с пространства за напорным вентилем, в котором движется ступенчатый поршень. Снятая там диаграмма представляет лежащую восьмерку, часто плоскую и совсем без площади, часто с двумя, одна другой равными, площадями, которые друг друга уравновешивают и при планиметрировании дают почти нуль. Но также часто обе половины восьмерки бывают столь различны, что на ступеньчатый поршень приходится заметная положительная или отрицательная работа. Его площадь составляет, приблизительно, половину площади собственно плунжера. Необходимо тщательно обдумать, следует ли соответствующую площади диаграммы работу вычесть или прибавить к работе плунжера, в зависимости от того, развивает ли ступенчатый поршень большее давление при входе или при выходе.

Относительно учета расхода работы насосов для продувки и для заряда при *двухтактных машинах внутреннего сгорания*, *распылительных насосов* при дизель-машинах, *конденсационных и питательных насосов* при паровых машинах, короче говоря, всех *вспомогательных* цилиндров, трактует § 94 и § 6 «Исследования Машин».

**§ 108. Вычисления при длительных испытаниях.** Может казаться, что было бы проще вместо того, чтобы сначала определять $h_m$ и среднее давление $p_i$ и затем пользоваться формулой $N = \frac{F \cdot p_i \cdot s \cdot n}{60 \cdot 102}$, свести все вычисление к одной формуле, в которую входили бы только непосредственно измеряемые величины: масштаб пружины, площадь и длина диаграммы и т. д.

Однако, приведенный ход расчета является общепринятым и весьма целесообразным. Значение $p_i$ — весьма ценная для суждения о машине величина, знать которую полезно. Этот способ расчета экономит работу в том случае, когда дело идет о подсчете большого числа диаграмм, которые снимаются последовательно, через каждые пять минут одна за другой, чтобы найти из них среднюю индикаторную мощность за более длительный промежуток времени или всю доставленную машиной работу в целом.

Так как ни длина диаграммы, ни ее площадь, ни самое число оборотов машины не остается строго постоянным, то из каждой диаграммы приходится, в порядке поправок, определять соответствующее $p_i$ и, пользуясь соответственным числом оборотов, находить соответствующую данному моменту мощность. Затем из всех этих мощностей приходится выводить их среднее значение. Это

отнимает много времени. Вместо этого можно с большим удобством вести расчет со средним значением $p_i$ и со средним числом оборотов и таким образом производить *одно* вычисление вместо целого ряда их. Однако, единичные значения как $p_i$, так и $n$ должны колебаться в столь узких пределах, чтобы можно было спокойно заменять среднее значение произведения произведением средних значений.

Расчеты можно еще более упростить: можно сразу выводить среднее значение площадей всех диаграмм и их длин и отсюда получить среднее значение всех $p_i$ однократным делением вместо того, чтобы вычислять $p_i$ для каждой диаграммы отдельно. Это допустимо не слишком часто [1].

Передняя и задняя площадь поршня цилиндра двойного действия у больших машин так мало друг от друга отличаются, что можно вводить среднюю площадь поршня $F_m$ — среднюю арифметическую площади поршня спереди и сзади и таким образом сразу определять общую мощность цилиндра. Тогда следует применять формулу $N_i = 2\frac{F_m \cdot p_i \cdot s \cdot n}{60 \cdot 102}$, где 2 указывает при расчете на двойное действие цилиндра.

Целесообразно отъединять в одну *константу цилиндра* все такие величины, которые зависят от размеров и типа машины. Тогда получается $N_i = C \cdot p_i \cdot n$. Таким образом, $C = 2\frac{F_m \cdot s}{60 \cdot 102} = \frac{(F_v + F_p) \cdot s}{60 \cdot 102}$ будет константой для машин двойного действия, а $C = \frac{F \cdot s}{60 \cdot 102}$ для машины простого действия; $C = \frac{1}{2} \times \frac{F \cdot s}{60 \cdot 102}$ для четырехтактной машины простого действия. Эта константа цилиндра соответствует объему, описываемому поршнем, однако, ей нельзя придать удобного наименования, так как согласно обычному обозначению в нее входит $F$ в кв. сантиметрах и $s$ в метрах.

*Пример определения расхода пара.* Машина одноцилиндровая, двойного действия, без конденсации, диаметр цилиндра 300 *мм*, диаметр поршневого штока (только спереди) 35 *мм*, ход поршня 400 *мм*. Константа цилиндра спереди 0,0456; сзади 0,0462. Масштаб пружины спереди 8,1 *мм/ат*, сзади 7,8 *мм/ат*. Тормозная нагрузка, поддерживаемая постоянной, 1,0 *м*×97,5 *кГ* = 97,5 *мкГ*. Продолжительность испытания с 4 до 5 час., отсчеты через каждые 10 мин. Результаты наблюдения дает таблица 20. Принимая во внимание масштабы пружин, вычисляем среднее избыточное давление спереди $p_i = \frac{10,95}{8,1} = 1,35$ *ат*, сзади $p_i = \frac{11,74}{7,8} = 1,51$ *ат*. Вместе с константой цилиндра это дает среднюю мощность спереди $N_v = 0,0456 \cdot 1,35 \cdot 75,0 = 4,63$ *квт* и сзади $N_h = 0,0462 \cdot 1,51 \times 75,0 = 5,22$ *квт*; средняя общая индикаторная мощность $N_i = 9,85$ *квт*.

Так как часовое потребление пара было 127,2 *кг*, то расход пара на единицу мощности, который также обозначается как *удельный расход пара*, исчисляется в $\frac{127,2}{9,85} = 12,48 \frac{кг}{квт\text{-}ч}$. Так как эффективная или тормозная мощность исчисляется в $N_e = \frac{97,5 \cdot 75,0}{973} = 7,51$ *квт*, то расход пара, отнесенный к полезной мощности, будет $\frac{127,2}{7,51} = 16,9 \frac{кг}{квт\text{-}ч}$. Это позволяет получить также механический коэфициент полезного действия $\eta_{мех} = \frac{7,51}{9,85} = 0,76$.

Вычисление индикаторной мощности, если и не с теоретической, то большей частью с достаточной точностью, можно произвести гораздо более простым способом. Можно избегнуть утомительного вычисления средней высоты таблицы 20, поступая таким образом: площадь диаграммы — среднее по всем диаграммам спереди и сзади — 1160 *мм*²; средняя длина диаграммы — 102,0 *мм*;

[1] В данном случае можно просто сложить площади всех диаграмм и, не выводя средней площади диаграммы, прямо делить полученную сумму на такую же сумму всех линий диаграмм, получая среднее значение $p_i$. В результате сберегаются два бесполезных деления на одно и то же число. Такой вывод, в случае постоянного числа оборотов, является *математически строгим*. (*Прим. перев.*).

Таблица 20

**Определение расхода пара**

| Время | | Счетчик | | Весы | | Площадь диаграммы | | Длина диаграммы | | Средняя высота | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Показания | Разность | Показания | Разность | спереди | сзади | спереди | сзади | спереди | сзади |
| час | мин | | | кГ | | мм² | | мм | | мм | |
| 4 | 0 | 6 341 | 752 | 63,1 | 21,1 | 1 130 | 1 200 | 102,5 | 100,1 | 11,02 | 11,99 |
| 4 | 10 | 7 093 | 755 | 84,3 | 21,4 | 1 170 | 1 210 | 103,1 | 101,0 | 11,33 | 11,98 |
| 4 | 20 | 7 848 | 751 | 105,7 | 21,2 | 1 140 | 1 200 | 102,9 | 100,0 | 11,08 | 11,90 |
| 4 | 30 | 8 599 | 747 | 126,9 | 21,2 | 1 120 | 1 170 | 103,2 | 101,0 | 10,83 | 11,58 |
| 4 | 40 | 9 346 | 745 | 148,0 | 21,1 | 1 110 | 1 160 | 103,2 | 101,2 | 10,75 | 11,46 |
| 4 | 50 | 0 091 | 750 | 169,1 | 21,2 | 1 120 | 1 180 | 103,5 | 101,3 | 10,81 | 11,63 |
| 5 | — | 0 841 | | 190,3 | | | | | | | |
| Среднее значение | | 4 500 : 60 $n = 75{,}0/мин$ | | 127,2 кГ/час | | — | — | — | — | 10,95 | 11,74 |

таким образом, в среднем $h_m = 11{,}38$ *мм*. Масштаб пружины — среднее переднего и заднего индикатора — 7,95 *мм* = 1 *ат*; следовательно, в среднем $p_i = 1{,}43$ *ат*, Константа цилиндра — сумма передней и задней — $C = 0{,}0918$. Таким образом, $N = 0{,}0918 \cdot 1{,}43 \cdot 75{,}0 = 9{,}84$ *квт*. Такой упрощенный метод можно применять, если величины, среднюю из которых мы берем, не слишком отклоняются друг от друга. Ни в коем случае нельзя, например, при вычислении мощности машины двойного расширения брать среднюю из констант для цилиндра высокого и низкого давления; здесь необходимо определять мощность каждого цилиндра в отдельности.

Следует еще отметить в отношении таблицы 20, что вполне целесообразно, как это и сделано, снимать диаграммы всегда посредине между двумя отсчетами по счетчику и по весам, именно в 4 *час* 5 *мин*, 4 *час* 15 *мин* и т. д., так как диаграмма должна давать среднее значение для промежутка времени от 4 *час* до 4 *час* 10 *мин* и т. д. В общем, отсчеты по приборам, дающим значения для данного момента, по отношению к отсчетам по суммирующим приборам (§ 12) должны быть сдвинуты на половину продолжительности между отсчетами. При этом удается избежать несогласованности, особенно в тех случаях, когда при длительных испытаниях подводят часовые итоги; отсчитанные для полных часов мгновенные значения не относятся, в сущности, ни к истекшему ни к наступающему часу [1]. Регулирование тормоза лучше всего производить вместе с отсчетами по суммирующим приборам, т. е. в 4 *час* 10 *мин*, 4 *час 20 мин* или же, что делается реже, в 4 *час* $2^1/_2$ *мин*, 4 *час* $7^1/_2$ *мин* и т. д. Планомерными предосторожностями в указанном направлении можно значительно повысить точность измерения. Отсчеты по суммирующим приборам, в сущности, нужны только в начале и в конце всего испытания; однако, промежуточные отсчеты, по разностям между ними, дают возможность контролировать равномерность хода и точность отсчетов и кроме того, если в течение намеченного для исследования времени случится какая-нибудь неполадка, позволяют спасти хоть часть результатов исследования.

**§ 109. Масштаб пружины. Выверка.** На индикаторных пружинах масштаб пружины дается обыкновенно в круглых числах. При точных исследованиях (имея в виду, что с течением времени масштаб пружины меняется) необходимо производить выверку пружины и определять масштаб ее опытным путем.

[1] Это правило вполне аналогично приведенному в конце § 24 правилу — брать производную посредством дериватора, всегда между двумя точками, определяющими данную кривую. (*Прим. перев.*).

При *выверке давлением* дают под поршень индикатора, начиная от атмосферного давления, различные давления, повышая ступенями, примерно, через одну атмосферу и прочерчивают на бумаге барабана горизонтальные линии, расстояния между которыми затем измеряются с точностью до 0,1 *мм*. Таким образом непосредственно получается масштаб пружины. Один ряд испытаний производят при возрастающем давлении, другой — при убывающем; благодаря трению, между обоими результатами получается разница, которая не должна быть слишком большой. Из обоих результатов берут среднюю. Для такой выверки можно пользоваться поршневым прессом.

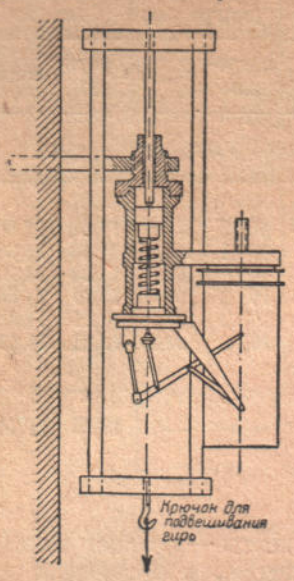



Рис. 305. Выверка индикаторной пружины гирями.

При *выверке гирями* поршень нагружается разновесками. Для этого, например, может служить устройство, изображенное на рис. 305, при котором грузы подвешиваются на подвесную рамку, опирающуюся на поршень укрепленного вверх ногами индикатора. Опять проводят горизонтальные линии на индикаторной бумаге; при этом целесообразно, перед проведением линии слегка встряхивать индикатор, чтобы уменьшить влияние трения; при действительном употреблении это трение, благодаря постоянным сотрясениям, также не велико, так как здесь дело идет о трении движения. Другие приборы описаны в Л.

При выверке гирями приходится измерять площадь поршня, чтобы иметь возможность вычислить соответствующее данной нагрузке давление. Выверка давлением не требует этого измерения диаметра поршня. При обоих методах выверки нужно принимать во внимание, что при нагревании поршня увеличивается площадь его и притом на 0,4% при повышении температуры на 100°С. Индикатор, для которого при холодной выверке найден масштаб 8,20 *мм/ат*, будет, при повышении температуры поршня до 120° (вместо прежних 20°), иметь масштаб $8{,}20 \times \left(1 + \frac{0{,}4}{100}\right) = 8{,}24$ *мм/ат*. Эта небольшая и довольно точная поправка необходима при выверке гирями, при выверке же давлением не нужна лишь в том случае, если температура поршня при выверке будет такая же, как и при позднейшем употреблении.

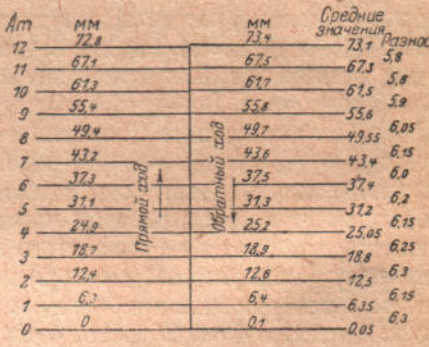



Рис. 306. Выверочная диаграмма индикаторной пружины.

По установленным VDI «Правилам определения масштаба индикаторных пружин» предписывается выверка гирями. Каждая пружина, которая принимает при употреблении индикатора высшие температуры, должна испытываться и холодной и горячей, при комнатной температуре и при температуре 100° С, по крайнем мере через пять ступеней над атмосферной линией и не менее, чем на трех ступенях ниже ее. Диаметр индикаторного поршня должен измеряться при комнатной температуре. Последнее правило может быть оправдано лишь в интересах единообразия измерения.

Еще большие поправки бывают необходимы, когда приходится пользоваться *индикатором с внутренней пружиной* (рис. 283) при индицировании паровой машины. Индикатор с холодной пружиной построен потому, что при изменении температуры на 100°, изменяется и масштаб пружины, примерно, на 4% (Л.).

О том, *какая выверка лучше*, давлением или гирями, было много написано.

Тот, кто придает большое значение преимуществам того или другого способа, переоценивает точность самого индикатора. При невнимательном обращении с индикатором возможная разница между обоими способами проверки совершенно исчезает по сравнению с другими источниками погрешностей. Против выверки давлением (самого по себе более естественного) возражают, что при нем трение в индикаторе сказывается в преувеличенном виде; при выверке мы имеем дело с трением покоя, тогда как при эксплоатации, особенно вследствие постоянных сотрясений, наоборот, с трением движения, которое, как известно, меньше. Ненадежность выверки гирями заключается в трудности точного измерения диаметра поршня. Ошибка на 0,1 *мм* означает погрешность в 0,5% по диаметру и следовательно в 1% от площади. Хотя столь больших ошибок при измерении микрометром и не бывает, но так как поршень в индикаторном цилиндре должен ходить легко и лучше несколько пропускать пар, чем иметь большое трение, то и диаметр цилиндра больше диаметра поршня, и кольцевое пространство между поршнем и цилиндром должно быть частично присчитано к поршню.

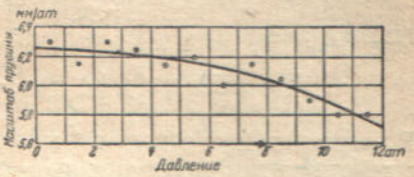



Рис. 307. Ход изменений истинного масштаба пружины рис. 306.

Не лишнее производить выверку по обоим способам; выверкой гирями проверяется равномерность деформации пружины; при такой проверке диаметр поршня и другие неточности не играют никакой роли; посредством же выверки давлением устанавливается масштаб пружины; для этого требуется применить только немногие, далеко друг от друга лежащие давления. Короче говоря: для определения среднего масштаба пружины лучшей кажется выверка давлением, ход же изменений этого масштаба лучше позволяет изучить выверка гирями.

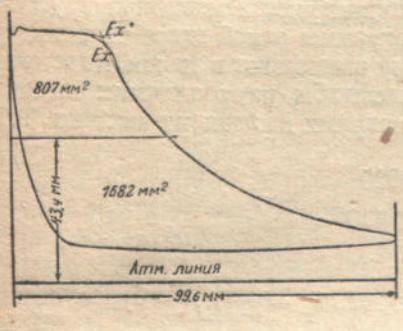



Рис. 308. Диаграмма цилиндра высокого давления паровой машины, снятая с пружиной, выверенной по рис. 306, $^1/_2$ натур. величины.

Масштаб пружины не всегда остается при всех давлениях одинаковым. При выверке на диаграммной бумаге получается диаграмма, изображенная на рис. 306. По этой диаграмме измеряют расстояние $s$ каждой линии от нулевой линии, берут средние значения из хода вперед и назад, чтобы исключить трение, и затем определяют разности $\Delta s$. Эти разности делятся на соответствующие приращения давления, тогда $m = \Delta s / \Delta p$ будет *средний масштаб пружины* для области давления $\Delta p$.

Средний масштаб пружины можно определять для больших областей, например, от 1 до 11 *ат*, или раздельно от 1 до 4 от 4 до 11 *ат*. Делая области измерения все у́же, мы приходим к *истинному масштабу* для одного определенного давления: $m = ds/dp$, который на рис. 307 представлен графически. Он убывает от 6,25 *мм/ат* до 5,7 *мм/ат*, что характеризует пружину, как неудовлетворительную [1]. Подобное же различие, как известно, делают и между средней и истинной теплоемкостью.

При определении индикаторной мощности вычисление чаще всего производят по среднему масштабу пружины. Если на диаграмме цилиндра высокого давления (рис. 308) давление падает от 11 до 1 *ат*, то при вычислении употребляют средний масштаб от 1 до 11 *ат*, Это является правильным при диаграммах водяных насосов, которые везде имеют одинаковую высоту; там же, где диаграммы (как начерченная на рис. 308 диаграмма паровой машины) вверху сравнительно у́же, чем внизу, там площади, соответствующие отдельным ступеням

[1] Это указывает, что с возрастанием нагрузки пружина делается жестче. Такой ход для пружины, работающей на сжатие, является естественным, но у хорошей пружины такое отклонение от пропорциональности должно быть мало заметным. (*Прим. перев.*).

давления, следует определять отдельно. Диаграмма горизонтальной прямой, которая соответствует на выверочной диаграмме рис. 306 давлению в 6 *ат*, разделяется на две отдельные площади; для верхней части диаграммы, от 11 до 6 *ат*, действителен (по рис. 306) масштаб 5,98 *мм/ат*, для нижней части, от 6 до 1 *ат*, действителен масштаб 6,19 *мм/ат*; для верхней части получается

$$J = 807\ мм^2;\ h_m = \frac{807}{99{,}6} = 8{,}11\ мм;\ p_i = \frac{8{,}11}{5{,}98} = 1{,}355\ ат,$$

для нижней части

$$J = 1682\ мм^2;\ h_m = \frac{1682}{99{,}6} = 16{,}9\ мм;\ p_i = \frac{16{,}9}{6{,}19} = 2{,}73\ ат.$$

В дальнейшем определение мощности производится как обыкновенно, но только с действующим давлением $p_i = 1{,}355 + 2{,}73 = 4{,}08$ *ат*. Вычисление всей площади дало бы $p_i = 4{,}11$ *ат*, т. е. почти на 1% больше.

Общую площадь можно разбить больше, чем на две части; однако, дальнейшее подразделение вызывает сравнительно малые изменения в результатах, потому что разницы в масштабах, так же как и в площадях, становятся меньше; с другой стороны, с дальнейшим подразделением возрастает и работа по вычислению. Но если даже ставить выше всего достижение возможно большей точности, то точность планиметрирования падает, когда приходится обводить очень узкие полосы. Таким образом, возможно вместо двух частей делить диаграмму на три или может быть на четыре части, но от деления на десять частей, соответственно выверенной диаграмме, нельзя ожидать большой точности; даже выверочная диаграмма при таких мелких подразделениях показывает неравномерности.

При длительных испытаниях, влияние неравномерности масштаба пружины можно учесть более просто, если различные диаграммы одной стороны цилиндра остаются сходными по высоте. Каждую диаграмму вычисляют в целом, но основываются на среднем масштабе, при котором масштабы на различных высотах входят в результат, соответственно площадям диаграмм на этих же высотах. Так, например,

$$\begin{array}{rl} 5{,}98 \cdot 807 = & 4820 \\ 6{,}19 \cdot 1682 = & 10\,410 \\ \hline \text{Сумма}\ \ 2489 = & 15\,230 \end{array}$$

*Взвешенное среднее значение* масштаба пружины $m_m = \frac{\Sigma(l \cdot m)}{\Sigma l}$ будет, таким образом, 15 230 : 2489 = 6,13 *мм/ат*; по нем вычисляют диаграммы, не разделяя их по высоте. И в этом случае можно делить диаграмму, но если делить на слишком большое число частей, то точность не будет увеличиваться. В знаменатель вводится сумма отдельных планиметрирований, $\Sigma l$, но не результат общего планиметрирования всей диаграммы, которая, вероятно, будет несколько от нее отклоняться.

Описанный способ определения среднего взвешенного масштаба пружины исходит от Эберле. Сопоставление подобных способов можно найти у Розера (Л.). При изучении хода линии расширения средний масштаб пружины мало помогает; в этом случае, на основании поверочной диаграммы, следует перечертить диаграмму в равномерном масштабе. Для этого можно пользоваться способом, данным Шротером и Кообом и описанным Розером в том же месте (Л).

Однако, все это лишь паллиатив. Лучше пользоваться хорошей равномерной пружиной.

Наибольшие неравномерности дают слабые пружины. Пружин на 2 атмосферы при нормальном поршне следует вовсе избегать и довольствоваться меньшей высотой диаграммы или употреблять индикаторы с четырехкратной площадью поршня (рис. 312). Обыкновенно оказывается разница в масштабе, выше и ниже атмосферной линии.

**§ 110. Смещенные диаграммы; диаграммы по времени и по пути.** Иногда снимают диаграммы, при которых передвижение барабана производится не от

крейцкопфа, принадлежащего к данному цилиндру, но от другого, повернутого на 90°, кривошипа. При машинах с кривошипами под углом в 90°, передвижение барабана производится от крейцкопфа соседнего цилиндра. В этом случае мертвая точка приходится по средине диаграммы. Такие *смещенные диаграммы* позволяют лучше проследить ход изменения давлений вблизи мертвой точки, чем обыкновенные, где этот ход сильно сжат.

На рис. 309 и 310 даны обыкновенная диаграмма хода поршня газовой машины рядом с другой, полученной от смещенного кривошипа. Каждая из изображенных диаграмм состоит из пучка отдельных диаграмм. Рис. 310 показывает, что вспышка как будто совпадает с мертвой точкой, а рис. 309, в виду того, что вспышка раздвигает друг от друга явления в области мертвой точки, показывает, что сгорание становится уже заметным значительно раньше мертвой точки — зажигание последовало еще раньше — и что возрастание давления происходит с меняющейся скоростью. Мертвые точки подмечены на диаграмме; благодаря конечной длине шатуна они лежат не точно по середине диаграммы. То, что положение мертвых точек при прямом и обратном ходе не совсем совпало, зависит от неточности измерения.

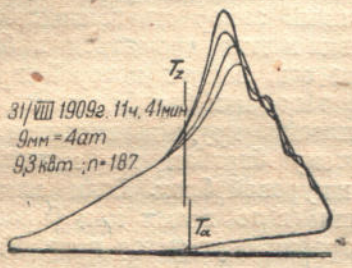



Рис. 309. Смещенная диаграмма, $^1/_2$ натур. величины.

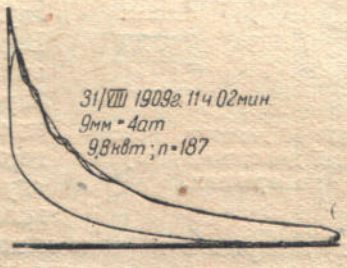



Рис. 310. Диаграмма по пути поршня, $^1/_2$ натур. величины.

При *диаграмме по времени* в качестве абсциссы откладывается время; больше нет конечной длины диаграммы, соответствующей переменно-возрастному движению поршня и диаграмма по времени сама по себе не имеет конца. Поэтому, для ее изображения требуется бесконечная поверхность для записи, которую в форме ленты — не бесконечной — или в форме замкнутой цилиндрической поверхности, заставляют двигаться перед пишущим штифтом. Если такая поверхность будет приведена в движение от равномерно идущего мотора, то мы получим собственно диаграмму по времени. Если поверхность будет передвигаться от кривошипного вала индицируемой машины, который имеет некоторую степень неравномерности движения, то мы получим диаграмму по пути кривошипа, сходную с диаграммой по времени. Лишь при больших степенях неравномерности, вроде насосов с медленным ходом, или при исключительно точных исследованиях приходится принимать во внимание разницу между обоими родами диаграмм.

Устройства для снятия диаграмм по времени (как мы их будем называть) в особенности предлагались Вагенером (Л.).

Если с барабана обыкновенного индикатора удалить зажимные пружины, служащие для натягивания бумаги, ограничитель хода и пружину для возвратного хода, этот барабан можно привести в простое вращательное движение. Вместо обыкновенного барабана можно с успехом применить барабан большего диаметра, который может быть легче первого, так как он не испытывает никаких изменений скорости. Так как пишущий штифт скользит по всей окружности барабана, то бумагу нельзя удерживать при помощи зажимной пружины. Следует употреблять бумагу такой длины, чтобы, будучи обернута вокруг барабана, она немного перекрывалась своими краями, которые склеиваются хорошо охватывающим клеем. Капля клея, нанесенная на обратную сторону бумаги, удерживает ее достаточно прочно на гладком барабане, чтобы она не скользила, но позволяет, пока не засохла, снять бумажную трубку целиком с барабана.

Бумага затем разрезается ножницами в подходящем месте. На рис. 311 изображен таким образом приспособленный *индикатор с вращающимся барабаном*. На барабане пишет не только пишущий штифт индикатора, но также отметчик, который отмечает мертвые точки машины, так как они теперь не получаются сами собой, как на диаграммах перемещения поршня. Колоколообразный электромагнит притягивает якорь и тем отмечает излом линии, которую пишущий штифт непрерывно чертит вокруг барабана. Возбуждение производится благодаря контакту, который машина замыкает при каждом первом или при каждом втором прохождении мертвой точки. Отметка только одних мертвых точек сама по себе достаточна; измерив число оборотов машины, можно вычислить и масштаб времени. Однако, удобнее отмечать на диаграмме и время, чтобы иметь возможность определять и число оборотов машины по той же диаграмме. Для этого служит пружинный запор на головке барабана. Верхняя державка может вращаться в барабане, она опирается на ось, вокруг которой вращается барабан. После того, как барабан надет, находящиеся на нем плоские пружины входят в зарубки державки; поэтому барабан не может совсем опуститься на шнуровой блок. Если накатанную головку державки (в то время как барабан вращается) задержать на одно мгновение, то барабан опускается вниз. Таким образом, можно записать сначала отметки мертвых точек вместе с диаграммой давления и тотчас за этим — отметки времени над отметками мертвых точек. Оба ряда отметок, как это было разъяснено в § 36 для рис. 105, дают возможность определить скорость машины. Вращающийся барабан, по рис. 311 может быть снят для того, чтобы надеть бумагу или и для замены его барабаном для снятия обычной диаграммы.

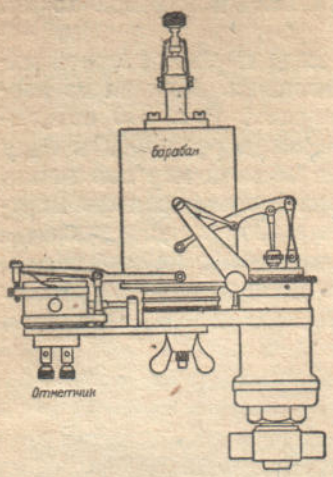


Рис. 311. Индикатор, приспособленный для снятия диаграмм по времени.

Индикатор по времени, записывающий диаграммы на ленте, показан на рис. 313. Бумажная лента сбегает с запасного ролика $R_1$, который только отчасти виден из-за стоек, через пару валиков $W$ (из которых виден только передний, закрытый бумажной лентой) на собирающий ролик $R_2$. Привод осуществляется посредством двух шнуровых шкивов $S$, из которых один представляет рабочий, а другой холостой; шкивы сидят на одной оси с задним валиком $W$, так что лента продвигается валиками, между которыми она зажимается пружинной скобой (расположенной на рис. под буквой $R_2$). На той же оси, приводимый снизу в движение шкивом $S$ сидит сверху шкив $G$, который увлекается осью посредством скользящего соединения и который, в свою очередь, при помощи ремневого шнура приводит в движение ролик $R_2$. Передача от $G$ и $R_2$ соразмерена так, что ролик $R_2$ наматывает бумагу быстрее, чем валики $W$ ее подают. Эту разницу, которая бывает особенно значительной, когда ролик $R_2$ почти полностью намотан, уравнивает, путем скольжения, упомянутое скользящее соединение. Если повернуть пружинящие державки $B_1$ и $B_2$, то можно снять ролики $R_1$ и $R_2$, чтобы надеть на них новую бумагу.

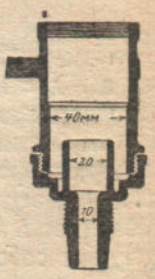


Рис. 312. Корпус цилиндра от индикатора рис. 311.

Под пишущим штифтом индикатора виден еще один пишущий штифт, который чертит простую линию на сбегающей ленте; линия атмосферного давления, которую ленточный индикатор сам не чертит, лежит над этой чертой на некотором расстоянии, которое можно установить, когда индикаторный кран закрыт.

Для того, чтобы наносить на диаграмму мертвые точки, служит отметчик $M$. Для отметки времени применяют второй отметчик. Вместо последнего применяется отметчик с колеблющейся пружиной, который применим и для вращающегося барабана, но без которого в последнем случае легче обойтись. Плоская пружина, находящаяся между якорем и штифтом, когда якорь притягивается,

приводит пишущий штифт в колебания, которые скоро затухают. Время одного колебания пружины постоянно для одного и того же пишущего механизма. Таким образом, заставляя машину возбуждать электромагнит в мертвой точке, мы получаем не только положение этой точки, но и мгновенную скорость бумажной ленты, а по расстоянию между мертвыми точками можем судить о числе оборотов машины.

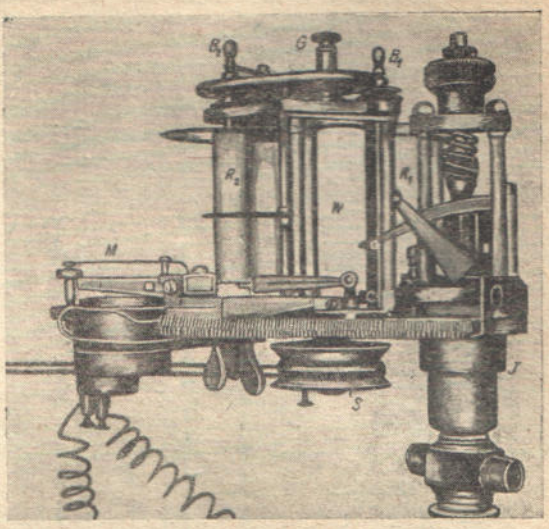



Рис. 313. Ленточный индикатор по Вагенеру, фабрики Дрейер, Розенкранц и Дрооп.

Ленточный индикатор имеет перед индикатором с вращающимся барабаном то преимущество, что на 45 метровой ленте можно зарегистрировать много диаграмм без перерыва и таким образом, например, проследить явления при регулировании какой-либо машины, когда каждая диаграмма несколько отклоняется от предыдущей. Наоборот, вращающийся барабан, прежде всего, имеет то преимущество, что его можно без больших издержек приспособить к обыкновенному индикатору и при помощи одного индикатора попеременно снимать диаграммы и по времени и по пути поршня. Барабан имеет также преимущество, в том, что его можно спокойно оставить вращаться на более продолжительное время и, при наступлении каких-либо неравномерностей в машине, быстро снять диаграмму.

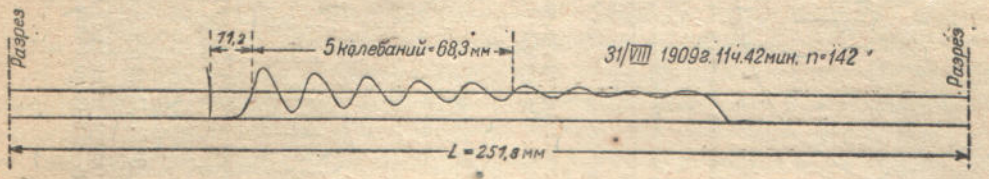



Рис. 314. Определение запаздывания отметочного механизма с колеблющейся пружиной, $^1/_2$ натур. величины.

При ленточном индикаторе, при таком длительном ожидании, бумага будет израсходована и в нужный момент ее может не оказаться.

По отметкам мертвых точек можно непосредственно судить о скорости бумажной ленты и хода машины. Для определения же положения мертвых точек нужно еще принять во внимание *запаздывание механизма отметчика*. При вращающемся барабане это запаздывание определяется таким образом: самый барабан заставляют замыкать контакт, причем один раз барабан поворачивают совсем медленно, от руки, а другой раз заставляют вращаться со скоростью, при которой им затем будут пользоваться, На барабан надевается бумага с вырезом; контактная пружина, скользящая по бумаге, попадая на вырез, замыкает ток. Более удобно кольцо, надетое на барабан и состоящее частью из изолирующего материала, частью из проводящего ток; отметчик пишет на узкой, натянутой над кольцом, бумажной полоске. При колеблющемся записывающем механизме получается рисунок, подобный изображенному и обработанному на рис. 314. При медленном движении барабана пишущий штифт чертит дугу круга, при быстром ходе, например, при числе оборотов бумажного барабана $n = 142/мин$ (измеренных ручным тахометром) эта дуга превращается в волнообразную затухающую линию. Кроме того, пускают барабан один раз с невозбужденным пишущим механизмом, другой раз с длительным возбуждением для того, чтобы получить прямую, пересекающую волны. Пусть при этом длина

5 волн получилась $5t_s = 68{,}3$ *мм*, а длина, отвечающая запаздыванию, $s = 11{,}2$ *мм*; тогда запаздывание будет $\frac{\rho}{t_s} = \frac{5 \cdot 11{,}2}{68{,}3} = 0{,}82$ от длины волны. При неколеблющемся записывающем механизме определение запаздывания совершается аналогичным образом, но только получается в секундах.

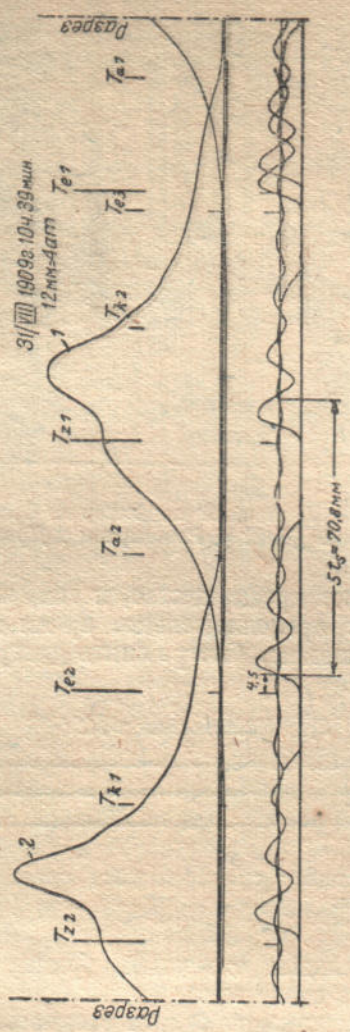



Рис. 316. Диаграмма по времени того же хода поршня, как на рис. 315, снятая с вращающимся барабаном и колеблющимся отметочным механизмом, $^1/_2$ натур. величины.

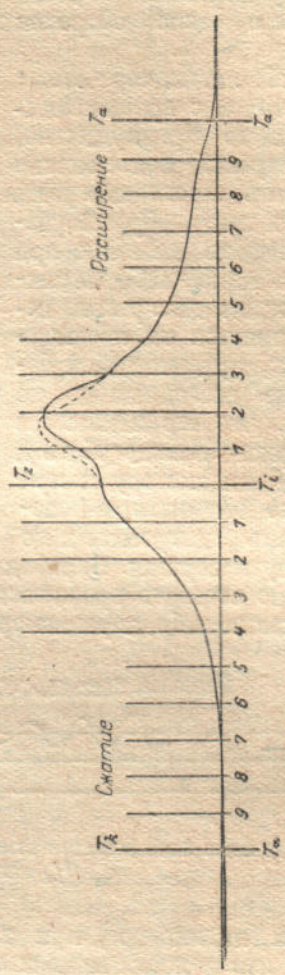



Рис. 319. Диаграмма по времени 1 рис. 316 с делением на 10 частей.

Пунктиром показан ход по диаграмме по пути поршня рис. 315; рис. 318, перерисованный, нанесенный так, как было снято индикатором совершенно одинаковой конструкции и одновременно. Заметная разница у вершины.

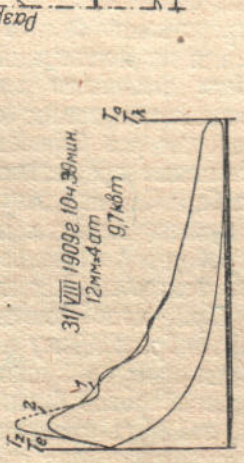



Рис. 315. Диаграмма по пути поршня газовой машины, $^1/_2$ натур. величины.

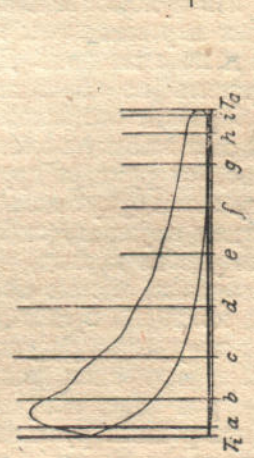


Рис. 318. Диаграмма 1 рис. 315 с делением на 10 частей.

*Диаграмма по времени* газовой машины дана на рис. 316, рядом с ней рис. 315 дает обычную диаграмму по пути поршня; обе диаграммы сняты в один

и тот же момент и таким образом записан один и тот же ход машины. Диаграмма по времени получена индикатором с вращающимся барабаном и колеблющимся отметочным механизмом. Числовые индексы показывают, относится ли мертвая точка к первому или второму рабочему ходу. По существу дела легко судить, что мертвые точки, в той последовательности, как они перенумерованы, должны быть всегда на одинаковом расстоянии друг от друга (продолжая измерение через край бумаги на другом конце).

Диаграммы по времени показывают у мертвых точек почти горизонтальный ход кривой, который не заметен на диаграммах по пути поршня, потому что при вращающемся барабане, вблизи мертвой точки поршень стоит почти неподвижно, тогда как бумага при снятии временной диаграммы продолжает двигаться вперед. Повышение давления после вспышки начинается вскоре после мертвой точки, в противоположность диаграммам рис. 309 и 310, так как в данном случае вспышка была установлена с большим опережением. Из сравнения диаграмм по пути поршня (рис. 310 и 315), это различие не так ясно заметно.

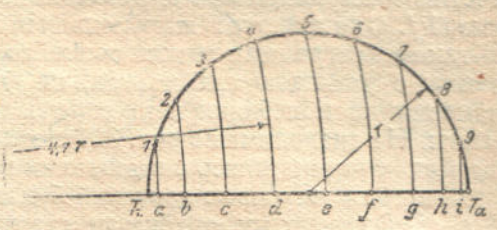



Рис. 317. Зависимость между путем поршня и путем кривошипа.

Иногда бывает желательно перечертить диаграмму по времени в диаграмму по пути поршня, чтобы получить по ней мощность, при условиях, исключающих ошибки, вызываемые растяжением шнура. Рис. 317 дает отношения между положениями, от *1* до *9*, кривошипа и соответствующими ему положениями поршня; с ее помощью получаются деления на рис. 318 и 319, по которым можно исполнить перерисовку путем перенесения соответствующих давлений.

Наоброот перечерчивание диаграммы по пути поршня в диаграмму по времени, трудно произвести точно, так как на диаграмме по пути поршня, явления вблизи мертвых точек нельзя различить достаточно отчетливо.

**§ 111. Погрешности движения пишущего штифта.** Предположение, что индикаторная диаграмма дает давление в цилиндре машины, в зависимости от пройденного поршня машины пути, при ближайшем расстоянии, соответствует действительности лишь приблизительно даже в том случае, когда употребляется пружина с точно пропорциональными отклонениями и шнуровая передача действует безукоризненно.

По существу индикатор является самопишущим манометром; для него действительно все, что было сказано в § 8 относительно динамических свойств приборов вообще и манометров в частности и пояснено на рис. с 15 до 17. Поведение пишущего механизма индикатора является наглядным примером изложенных там отношений. Таким образом, там, где на диаграмме по времени кривая меняет свое направление (такому изменению большей частью соответствует также и изменение направления в диаграмме пути поршня) — там возникают *упругие колебания*, портящие диаграмму, поскольку ординаты уже не представляют точно давлений.

На площадь диаграммы эти колебания, пока дело идет об умеренном числе оборотов, при прочих нормальных обстоятельствах, не оказывают слишком большого влияния и часто могут не приниматься во внимание. Наблюдения же за ходом кривой расширения и все более тонкие измерения, прежде всего становятся, благодаря упругим колебаниям, невозможными. Таким образом, на определении количества пара, работающего в цилиндре паровой машины по индикаторной диаграмме, как это указывалось в § 68 и рис. 158, не очень отражается, если вместо точки *Ex* будет взята другая точка на незначительно искаженной сглаженной линии. С другой стороны, совершенно неверные результаты дадут точки диаграммы, как раз отвечающие максимуму или минимуму отдельного колебания. На рис. 308 можно видеть, что возникновение только *одного* колебания, которое легко можно проглядеть, может привести к тому, что за начало

кривой расширения будет принята не точка *Ex* или *Ex*, но точка, отстоящая дальше направо.

Такие колебания можно свести к допустимым размерам, при помощи надлежащих мероприятий при индицировании или можно допустить их возникновение и затем, путем их оценки или расчетно-графических приемов, исключить их из полученной диаграммы. Последнее возможно только при диаграммах по времени и редко осуществляется (§ 114) вследствие большой затраты времени. Речь идет о том, как выявить упругие колебания, как таковые, и свести их к умеренным значениям.

На рис. 320—323 представлены некоторые диаграммы с более или менее отчетливо выраженными колебаниями, которые отмечены поставленной рядом буквой *f*. Они действительно появляются всегда после изменения направления. По таким диаграммам можно спокойно производить определение площади диаграммы с помощью планиметра, на диаграммах насосов можно не обращать внимания на колебания и проходить их штифтом планиметра посередине их высоты. На диаграмме по рис. 324 стараются провести кривые *cd* и *ce* так, чтобы они везде соприкасались с вершинами волн, вызванных упругими колебаниями. Тогда истинною кривою давлений будет кривая *cb*, как средняя кривая между *cd* и *ce*. Одинаковым ординатам отвечает средняя абсцисса, а не так, чтобы расстояние, измеренное по нормали к кривой *cb* было с обеих сторон одинаково.

Наконец, с точностью в большинстве случаев достаточной, проводят от руки кривую *cb*, возможно равномерной кривизны, пересекая упругие колебания таким образом, чтобы маленькие площадки, лежащие по обеим сторонам проведенной кривой, равномерно возрастали. Непрерывность изменения кривизны можно проверить, наклонив голову вплотную к бумаге и глядя вдоль кривой. Точка *b* будет представлять собой начало расширения диаграммы. Без

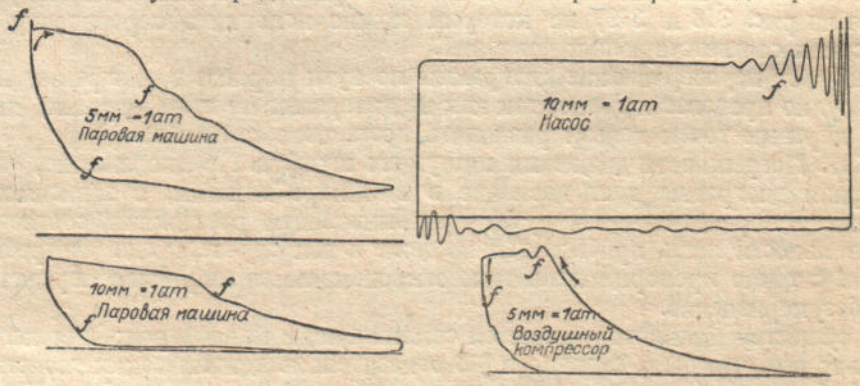



Рис. 320—323. Диаграммы при колеблющейся пружине, $^1/_2$ натур. величины.

такого выправления диаграммы применение правила Симпсона совершенно недопустимо, так как можно взять слишком большие ординаты. Так как вообще маленькая площадка *1* будет больше, чем площадка *2*, а *3* больше чем *4*, то можно также видеть, что в данном случае колебания делают площадь диаграммы больше.

При обработке диаграммы газовой машины (рис. 320) приходится встречаться с практическим затруднением, так как почти невозможно отличить отдельные диаграммы одну от другой. Если эти затруднения становятся слишком большими, то необходимо уменьшить колебания индикатора, применяя индикаторы с меньшими движущимися массами, применяя поршни больших диаметров с соответствующим усилением измерительных пружин, так что высота диаграммы остается неизменной; или наконец применяя более сильные пружины, может быть, одновременно уменьшая площадь поршня для уменьшения высоты диаграммы. Все эти мероприятия направлены к одной цели — увеличить собственное число колебаний пишущего механизма, т. е. мы возвращаемся к положениям § 8.

Уменьшение высоты диаграммы представляет удобнейшее и вместе с тем наиболее действительное средство. Однако, нужно указать, что меньшие площади диаграмм нельзя планиметрировать с такой же точностью как большие.

Когда пытаются достигнуть уменьшения высоты диаграммы применением меньшего поршня, то трение остается без перемены, тогда как перестанавливающая сила уменьшается; влияние трения, таким образом, возрастает. Поэтому к применению меньших поршней можно обращаться лишь в том случае, когда нет под рукой более сильной пружины. Применение большого поршня при одновременном усилении пружины увеличивает собственное число колебаний пишущего механизма, потому что увеличение площади поршня в незначительной степени увеличивает общую массу движущихся частей. В тех границах, в которых это вообще применимо, этот способ является наилучшим для уменьшения колебаний, потому что влияние трения уменьшается вследствие увеличения перестанавливающей силы. Таким образом, воздуходувки и цилиндры низкого давления паровых машин следует, по возможности, индицировать лишь с поршнями в 40 *мм* диаметром вместо 20 *мм* поршней со слабыми пружинами. Третье средство для уменьшения упругих колебаний — это применение индикаторов, специально сконструированных для больших чисел оборотов и для взрывных моторов (вследствие внезапно наступающего повышения давления индикатором приходится работать в более тяжелых условиях). Эти индикаторы имеют особенно малые движения массы при нормальном диаметре поршня (рис. 295 и § 116). Вполне понятно, что вследствие своей более легкой конструкции они быстрее повреждаются при неосторожном обращении.

*При индицировании жидкой среды*, как например, при насосах, применение больших поршней большей частью не дает никакого уменьшения упругих колебаний, но наоборот ведет к их усилению. Для того чтобы сделать возможным движение индикаторного поршня, количество жидкости, отвечающее освобожденному или вытесненному им объему, должно попеременно втекать и вытекать из индикатора через индикаторный штуцер. Ее масса таким образом присоединяется к движущимся массам пишущего механизма. При газах и парах эта масса незначительна, но при жидкостях — значительна; таким образом, увеличение поверхности поршня имеет следствием увеличение и этой добавочной массы. Даже более того: с этой массой нельзя так просто вести расчеты, как с собственной массой поршня. Если индикаторный штуцер имеет отверстие в 10 *мм*, а поршень диаметр в 20 *мм*, то вода в индикаторном штуцере приобретает четырехкратную скорость поршня, а, следовательно, воспринимает энергию в 16 раз большую энергии поршня. В общем, находящаяся в индикаторном штуцере масса жидкости должна быть прибавлена к массе индикаторного поршня, увеличенной пропорционально четвертой степени отношения диаметров поршня и штуцера. Этим объясняются сильные упругие колебания на диаграмме насоса (рис. 322), хотя она снята только при 60 *об/мин* и диаграмма по времени показывает, что изменение давления не протекает внезапно. При насосах упругие колебания уменьшаются, главным образом, путем широкой расточки индикаторных штуцеров и нижних каналов индикатора, а в крайнем случае — уменьшением поршня индикатора, хотя при этом увеличивается влияние трения.

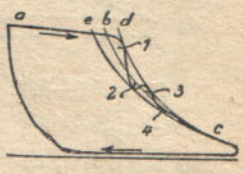


Рис. 324.

Само собой разумеется, что колебания могут быть устранены путем демпфирования, будет ли это достигнуто увеличением молекулярного демпфирования или увеличением трения. Однако, приборы, которые должны отмечать колебания, не могут быть сильно демпфированы, в особенности трением. Хотя сильное демпфирование и заглушает колебания, но заставляет также уклоняться пишущий штифт. Во всяком случае, умеренное молекулярное демпфирование, какое показывают диаграммы рис. 320—323, является желательным и незначительно влияет на результаты, являясь к тому же неизбежным. Безусловно вредным является трение, причем, насколько сильно трение пишущего штифта о бумагу влияет на результаты, в особенности при употреблении малых поршней и слабых пружин, показывают рис. 325—328; каждая из диаграмм была записана дважды, непосредственно одна за другой, причем один раз пишущий штифт прижимался к бумаге слабо, а другой раз сильно, в последнем случае колебания исчезали, но диаграммы получались заметно неправильные. Поэтому некоторые

упругие колебания можно даже рассматривать как признак хорошего состояния индикатора, но необходимо требовать, конечно, чтобы они были столь слабыми, как на рис. 321, где их может заметить только опытный глаз.

Можно также назвать другие причины отклонений показаний пишущего штифта от давления в *цилиндрах машины*. Как трение пишущего штифта искажает диаграмму, так еще в большей степени может искажать ее трение поршня. Отсюда правило, что поршень должен свободно ходить, хотя бы пропускал при этом пар, но не заедал в своем цилиндре. Отверстие в индикаторном штуцере — (не касаясь упомянутого, зависящего только от ширины, воздействия движущихся масс) обусловливает демпфирование, вызываемое сопротивлениями в проводке. Изменения давления передаются в цилиндр индикатора искаженными. Поэтому проводка не должна быть слишком узкой, — того требует и действие масс — но также и не слишком длинной; поворотов в ней следует избегать. Неблагоприятные отношения получаются всегда, когда приходится индицировать оба конца цилиндра, при помощи *одного* индикатора, особенно при высших числах оборотов.

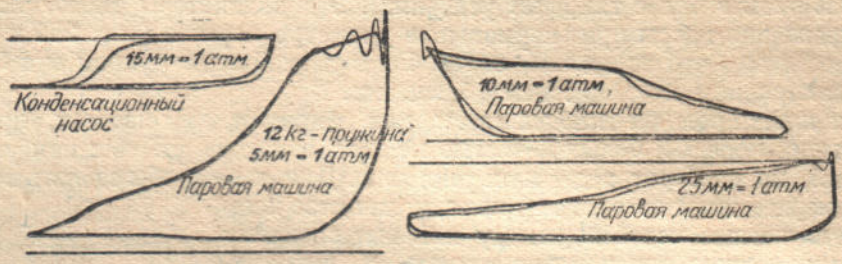



Рис. 325—328. Влияние трения пишущего штифта на индикаторную диаграмму, $^1/_2$ натур. величины.

Кроме того, погрешности в движении пишущего штифта могут возникать вследствие мертвого хода в сочленениях и прогибов в частях пишущего механизма. Заботливым уходом за индикатором эти погрешности можно держать в допустимых границах. В частности, в том, что передача пишущего механизма находится в порядке, можно убедиться, проводя при закрытом индикаторном кране атмосферную линию и затем нормаль к ней при неподвижном барабане. Обе линии должны быть перпендикулярны друг к другу и быть прямыми; погрешность может происходить и от того, что оси барабана и цилиндра не параллельны друг другу.

На рис. 329 и 330 даны диаграммы, на которых петли слева можно бы объяснить неплотностью поршня и поздним впуском. Причина же здесь другая; здесь дело идет о *перекрытии индикаторного отверстия* поршнем машины. Пока отверстие индикатора отделено от плоскости цилиндра, давление в нем остается постоянным или несколько падает, если поршень индикатора не плотно пришлифован. В этом случае в цилиндре следует прорубить зубилом канавку *достаточной ширины*, для обеспечения индикатору свободного хода.

Рис. 329 и 330. Перекрытие отверстия индикаторной пробки.

Все это — главные *формальные* ошибки, которые могут появиться в диаграммах вследствие *недостатков в индикаторе*. *Действительные* недостатки правильно снятой диаграммы, а также суждения о парораспределении и экономичности машины изложены в «Исследовании машин», при рассмотрении различных типов машин.

**§ 112. Обратное действие индикатора на ход машины.** При малых машинах и при таких, у которых вредное пространство весьма мало (компрессоры, паровые машины Корлисса), заметно изменяется ход машины от присоединения индикатора. При этом диаграмма не дает наблюдаемые на практике эксплоатационные условия и при всяких выводах следует соблюдать осторожность.

Прежде всего, ход машины изменяется от того, что пространство под поршнем индикатора обращается во вредное пространство; машина, имевшая вредное пространство в 1%, теперь имеет около $1^1/_4$%. Поэтому диаграмма представляет, если и не точно эксплоатационные условия исследуемой машины, то во всяком случае возможные условия. Но кроме того, передвигающийся поршень индикатора, благодаря своему движению, оставляет за собой в различные моменты времени большее или меньшее пространство: пространство это должно заполняться работающей средой. Поэтому вредное пространство оказывается зависящим от давления в цилиндре. Это такие условия, которые на практике не могут быть наблюдаемы; лишь периодические расширения корпуса насоса (его *«дыхание»*) можно сравнить с таким явлением.

Как сильно могут быть изменены эксплоатационные условия работы насоса при включении индикаторов насоса, показывают смещенные диаграммы подъема вентиля (рис. 331), из которых одна снята при открытом, другая при закрытом индикаторном кране. При открытом индикаторном кране клапан позже подымается с своего седла, так как вода сперва должна заполнить освобождаемое поршнем индикатора пространство; рабочий ход насоса таким образом индикатором ухудшается. Ухудшается также и объемный коэфициент полезного действия.

Рис. 331. Смещенная диаграмма поднятия насосного клапана (по Бергу).

**§ 113. Погрешности в движении барабана.** Движение бумажного барабана может быть не свободно от погрешностей, благодаря *изменяющемуся натяжению шнура*, если бы даже отсутствовали возможности геометрических неправильностей в приводе. Эти изменения натяжения, если они даже влекут изменения в длине диаграммы, не вызывают обязательно погрешности в диаграмме; но поскольку натяжения не пропорциональны ходу, возникают погрешности в зависимости от величины отклонений от пропорциональности.

Причины меняющегося натяжения шнура лежат в переменном напряжении пружины барабана при ходе вперед и назад, а также в действии вращающихся масс барабана. Первые обусловливают некоторое укорочение диаграммы, вторые — ее удлинение; первые не зависят от числа оборотов машины, последние с числом оборотов возрастают. В том, что растяжение шнура может принимать заметные значения, можно убедиться следующим наблюдением; при медленном ходе диаграммы получаются короче, чем это следует из передаточного числа ходоуменьшителя; особенно это заметно, когда два индикатора включены последовательно один за другим, — при этом вследствие растяжения промежуточного шнура ход второго барабана бывает короче первого (рис. 301). Чем быстрее, однако, ход машины, тем длиннее получаются диаграммы; таким образом, можно достигнуть теоретической, следующей из геометрического отношения передачи, длины диаграммы и даже ее превысить. В общем, при всех таких изменениях речь может итти о разницах в длине от 1 до 5 *мм* или одного процента.

Существенными, как уже было упомянуто, являются лишь отклонения от пропорциональности; относительно этого можно сказать следующее. Вызываемые меняющимся напряжением пружины растяжения шнура не вносят никаких погрешностей в диаграмму, если эти напряжения остаются пропорциональными соответствующим продвижениям барабана и если растяжения шнура также следуют закону Гука. Воздействие движущихся масс не вносят никаких погрешностей в диаграмму, если движения барабана в зависимости от времени выражаются чистой синусоидальной функцией. Пусть $x$ выражает отклонения крейцкопфа, $y$ — отклонения барабана, приведенные к масштабу первого в отношении передаточного числа ходоуменьшителя и оба исчислены от середины диаграммы таким образом, что положительный знак относится к направлению возрастающего напряжения пружины барабана. Пусть $m$ — приведенная масса барабана, $P_1$ — возрастание напряжения пружины для $y = 1$ и $P_0$ — предварительное напряжение пружины в среднем положении барабана, все три отнесены к расстоянию оси шнура от оси барабана, и пусть $\alpha$ — растяжение шнура на 1 *кГ*

нагрузки, а $t$ — время; тогда будет напряжение пружины $P_0 = P_1 y$, напряжение шнура $P_0 = P_1 y - m\frac{d^2y}{dt^2}$, растяжение шнура $\alpha\left(P_0 + P_1 y - m\frac{d^2y}{dt^2}\right)$. Тогда отклонение барабана от середины равно отклонению крейцкопфа, уменьшенному на величину растяжения шнура:

$$y = x - \alpha\left(P_0 + P_1 y - m\frac{d^2y}{dt^2}\right). \qquad (2)$$

Если мы теперь обозначим через $l$ длину диаграммы, а через $c$ — постоянную, то $y = \frac{l}{2}\sin ct$, откуда

$$\frac{d^2y}{dt} = -\frac{1}{2}c^2 \cdot \sin ct = -c^2 y;$$

подставляя в (2), получаем

$$y = x - \alpha(P_0 + P_1 y + mc^2 y), \qquad (3)$$

уравнение, представляющее линейную зависимость между движением барабана и крейцкопфа.

Это соотношение будет нарушено, если не будут выполнены вышепоименованные условия; неустранимым является влияние конечной длины шатуна, которое к члену, зависящему от ускорения движущихся масс, присоединяет еще другой, который вносит нарушение пропорциональности, в особенности тогда, когда с возрастанием числа оборотов сила инерции возрастает. Так как $c$ при повышении числа оборотов возрастает, то это может провести к тому, что при отрицательных значениях $y$ выражение в скобках станет отрицательным: в области мертвой точки, ввиду более слабого напряжения пружины, шнур потеряет натяжение, и барабан будет двигаться самостоятельно. Поэтому при более высоких числах оборотов необходимо увеличивать предварительное натяжение $P_0$ пружины, во всяком случае до устранения ослабления шнура, лучше же несколько больше для того, чтобы ослабить влияние последнего члена, которое, как было упомянуто, при конечной длине шатуна является неблагоприятным. Точно также неблагоприятно оно и при большой неравномерности хода машины; однако этой неравномерности как раз при высоком числе оборотов не приходится ожидать. Укорочение хода барабана, естественно, уменьшает также действие масс, однако маленькие диаграммы труднее точно планиметрировать.

Величиной, которая во всех случаях вносит погрешность в диаграммы, является трение барабана на своей оси. Хотя в уравнении (3) это трение должно войти в виде постоянного члена, но его знак в мертвых точках будет меняться. По достижении мертвой точки барабан некоторое время будет оставаться совершенно неподвижным, пока не будет преодолено трение и не начнется обратный ход. Части диаграммы, начерченные при прямом и обратном ходе, окажутся сдвинутыми друг относительно друга. О пропорциональности, таким образом, не может быть и речи; графическое дополнение урезанных концов диаграммы в смысле устранения смещения всегда будет иметь сомнительную ценность [1]. Поэтому следует заботиться об уменьшении трения, влияние которого, впрочем, при хорошем уходе за индикатором, кажется, не велико.

[1] В этих тонкостях автор опять слишком осторожен. Здесь в сущности речь идет о том, что пока при положении барабана в мертвой точке сила натяжения шнура не изменится на величину трения, приведенную к радиусу шнурового блока, барабан будет стоять на месте, и полный его ход сократится на упругое изменение длины шнура, соответствующее этой приведенной силе трения. На такой отрезок эта ветвь диаграммы окажется сдвинутой назад. При другой половине хода то же самое произойдет с другой ветвью диаграммы. В результате такого смещения уменьшится как длина, так и площадь диаграммы. Попробуем оценить величину такого смещения.

Радиус $r$ оси барабана составляет обыкновенно около $^1/_5$ радиуса $R$ барабана и его шкива: $\frac{r}{R} = 0{,}2$. Коэфициент трения $\varphi$ барабана на оси (сталь по меди) примем $\varphi \sim 0{,}1$. При силе натяжения шнура $P$, сила трения $p$, приведенная к радиусу барабана, будет $p = \varphi \cdot P\frac{r}{R} = 0{,}1 \cdot 0{,}2\ P = 0{,}02\ P$, а изменение длины шнура, вызываемое этой силой, также будет 0,02 полного удлинения индикаторного шнура, приведенного к радиусу барабана. Оценивая такое приведенное полное удлинение в 5 *мм*, получим искомый сдвиг 5 *мм* $\cdot$ 0,02 = 0,1 *мм*, — величину, лежащую на границе точности измерения. (*Прим. перев.*).

В общем, из сказанного можно заключить, что неправильности в движении барабана, вытекающие из второстепенных причин, можно держать в умеренных границах. Во всяком случае, остается важное правило — заботиться, чтобы шнур возможно меньше вытягивался. Специально изготовляемый индикаторный шнур значительно менее растяжим, чем обыкновенный шпагат; перед употреблением он должен быть достаточно вытянут, и вообще бывший в употреблении шнур лучше нового. Кроме того, следует заботиться, чтобы шнур от ходоуменьшителя до барабана был возможно короче, так как его растяжение входит в диаграмму несокращенным. Обычный метод— приводить в движение оба индикатора от одного ходоуменьшителя, причем первый барабан приводит в движение второй — при машинах с длинным ходом встречает возражения: движение второго цилиндра будет неправильным.

**§ 114. Графическое исключение инерционных колебаний.** (Л.). Движения пишущего штифта не представляют хода изменения давлений в чистом виде, но отклоняются от него в меру воздействий демпфирования, трения и сил инерции движущихся масс.

Из начерченной пишущим штифтом индикатора кривой действительного пути индикаторного поршня можно, хотя только из диаграммы по времени, найти ход изменения давления $p$, который нас интересует, исключив влияние вышеупомянутых величин. Так, по рис. 17 из кривой, данной непосредственно прибором, можно вывести ход изменения измеряемой величины, который изображен на рисунке жирной линией $XAN$.

На поршень индикатора в каждый момент $t$ действуют следующие силы: подлежащее измерению давление $p$ действует вверх на площадь поршня $f$. Если мы будем обозначать действующие вверх силы как положительные, то соответствующая давлению сила будет $+p \cdot f$. Пружина давит на поршень сверху вниз с силой, которая зависит от масштаба пружины $c$ и от отклонения $s$ поршня от его положения покоя; эта сила, таким образом, выражается через $-s \cdot c$. Трение при таких исследованиях считается постоянным, но только знак его меняется вместе с направлением движения; пусть оно действует на поршень с силой $\pm w$. Энергию, уничтожаемую при молекулярном демпфировании, следует считать пропорциональною квадрату скорости; поэтому вызываемая демпфированием сила будет пропорциональна скорости $ds/dt$ демпфируемой части прибора. Эта энергия выражается с помощью множителя пропорциональности $\varepsilon$ — коэфициента демпфирования — в виде $-\varepsilon \cdot \frac{ds}{dt}$, всегда с отрицательным знаком, так как хотя она противодействует движению, но также автоматически меняет знак вместе с переменой направления движения [1].

Присоединяя к этим внешним силам и силы инерции движущихся масс, которые выражаются через массу $m$ и ускорение $d^2s/dt^2$ поршня и которые, как противодействующие возрастанию скорости, обозначаются $-m\frac{d^2s}{dt^2}$ можно написать уравнение равновесия:

$$p \cdot f - c \cdot s - \varepsilon \frac{ds}{dt} \pm w - m\frac{d^2s}{dt^2} = 0$$

или

$$p \cdot f = c \cdot s + \varepsilon \frac{ds}{dt} \pm w + m\frac{d^2s}{dt^2}. \qquad (4)$$

Все члены правой стороны уравнения могут быть определены. Относительно самого $s$ следует иметь в виду, что он представляет путь поршня в увеличенном виде, большей частью в шестикратном масштабе. Кроме того, этот путь поршня следует выражать в метрах, так как здесь лучше всего придерживаться единиц технической системы мер, иначе определение масштаба часто становится затруднительным. Так как все члены уравнения должны быть даны в $кГ$, то и масштаб

[1] Учитывая, конечно, и перемену знака скоростью $\frac{ds}{dt}$ $+ds$ при движении вверх и $-ds$ при движении вниз. (*Прим. перев.*).

пружины $c$ должен быть выражен не в *мм/ат*, а в *кГ/м* и быть отнесенным не к перемещению пишущего штифта, а поршня индикатора. Так, пружина, которая при выверке давления показала масштаб 1,972 *мм/ат* и которая работает с поршнем диаметром 9,985 *мм*, что соответствует площади поршня 0,7830 *см*² и при пишущем механизме с шестикратной передачей дает под действием силы в в 0,7830 *кГ* стрелу прогиба $\frac{1{,}972}{6}$ *мм* = 0,000329 *м*; отсюда получается $c = \frac{0{,}7830}{0{,}000329} = 2380$ *кГ/м*. Это и есть упругая постоянная пружины. Дальше необходимо найти $ds/dt$ и $d^2s/dt^2$ двукратным диференцированием кривой $s$, начерченной в функции от $t$, т. е. диаграммы по времени. Для этого употребляется дериватор (§ 69). Для точного графического диференцирования необходимо позаботиться о подходящем наклоне кривой путем подбора соответствующей скорости движения диаграммной бумаги. Остается найти при помощи специальных опытов $\varepsilon$, $w$ и $m$. Трение $w$ находят, заставляя один раз пишущий штифт подняться вверх и медленно опускаться в положение покоя, другой раз то же самое проделывается в направлении снизу вверх. Разница между обоими положениями покоя соответствует удвоенному трению. Если при вышеупомянутой пружине эта разница оказалась в 0,2 *мм*, то трение выражается на диаграмме расстоянием в $\pm$ 0,1 *мм*; ему отвечает $w = \frac{2380 \cdot 0{,}0001}{6} = 0{,}04$ *кГ*. Находить *массу* $m$ путем взвешивания здесь не годится, так как речь идет не об одной массе поршня, но также о массе пишущего механизма и пружины, которые в своих различных частях имеют и различные скорости, отличающиеся от скорости поршня. Приведенная масса $m$ и коэфициент затухания $\varepsilon$ могут быть определены, исходя из общих законов упругих колебаний. Продолжительность одного полного (двойного) колебания будет

$$t_s = \frac{4\pi m}{\sqrt{4c \cdot m - \varepsilon^2}}. \tag{5}$$

Для отношения $\delta$ двух, следующих одна за другой амплитуд (здесь подразумевается не две последовательные положительные амплитуды, а две последовательные амплитуды противоположных знаков, которые следовательно отстоят друг от друга на $\frac{1}{2} t_s$), имеет силу выражения

$$\ln \delta = \frac{\varepsilon \cdot \frac{1}{2} t_s}{2m} = \frac{\varepsilon \cdot t_s}{4m}. \tag{6}$$

Величины $t_s$ и $\delta$ можно взять по диаграмме и отсюда вычислить $m$ и $\varepsilon$. Для $m$ получается

$$m = \frac{c \cdot t_s^2}{4(\pi^2 + [\ln \delta]^2)}. \tag{7}$$

Отсюда можно *раз навсегда* вычислить приведенную массу движущихся частей или, по крайней мере, массу собственно пишущего механизма и затем каждый раз присчитывать поршень и некоторые добавочные массы. Последние должны сообщать колебаниям удобную для расчетов величину. Для вычисления затухания, которое, в виду его меняющейся величины, не может быть выполнено раз навсегда, представляется удобным исключить время колебания; подставляя значение $t_s$ из (5) в (6), получаем

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{4\, c \cdot m \cdot (\ln \delta)^2}{\pi^2 + (\ln \delta)^2}}. \tag{8}$$

Затем записывают специальную диаграмму колебаний при помощи того же индикатора, которым всегда пользуются, для чего сначала поднимают поршень в его верхнее положение, например, подпирая его маленькой вилкой, подведенной под шаровое сочленение (рис. 311) и затем быстро выдергивают эту вилку. Колебания записываются на вращающемся барабане в зависимости

от времени (рис. 332). Время колебаний может быть непосредственно измерено в виде отрезка $t_s$ после того, как положения наибольшего отклонения найдены делением пополам хорды $kk$. Под $\delta$ подразумевается отношение последовательных амплитуд при *чистом демпфировании* колебаний. Трение на диаграмме представлено прерывным рядом $B$, $D$, $F$, $H$, $K$ . . . ., причем скачок всегда наступает со стороны большей амплитуды. От $A$ до $C$ колебания можно рассматривать, как происходящие около средней точки $B$, от $C$ до $E$, как происходящие около точки $D$ и т. д. Таким образом, $\delta$ можно рассматривать как отношение $x_1 : x_2$ или также как $x_3 : x_4$ . . . . Обозначив опять трение, величина которого уже определена, через $w$, а амплитуды, измеренные от $M$ через $x'$, $x''$ . . . . мы получим $\delta = \frac{x' - w}{x'' + w} = \frac{x'' - w}{x''' + w}$. Отсюда можно по формуле (7) определить $m$, а также (тоже для данного момента) по формуле (8) — $\varepsilon$.

Если мы хотим определить затухание, вследствие его изменчивости, перед опытом, чтобы по возможности приблизиться к условиям действительного пользования, то для этого можно использовать обычные индикаторные диаграммы, на которых имеются достаточно заметные колебания; например, у газовой машины можно усилить взрывные толчки введением более богатой смеси. Рис. 333 построен на подобной диаграмме и представляет часть кривой расширения. На рисунке проведены две кривые, огибающие колебания. Делением пополам ординат получается средняя кривая, изображающая ход изменения давлений, так как в этом месте изменение давления само по себе идет равномерно. Делением пополам хорд, проведенных параллельно средней кривой, определяются высшие точки и полу-

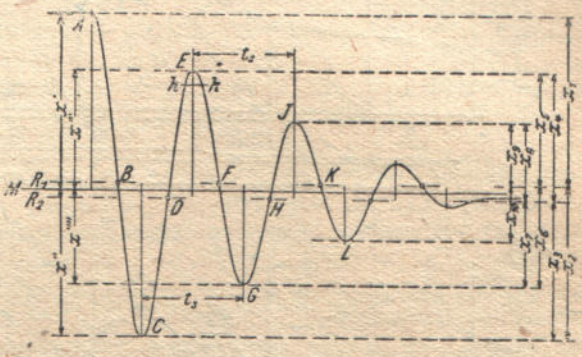



Рис. 332. Вдвойне демпфированное колебание.

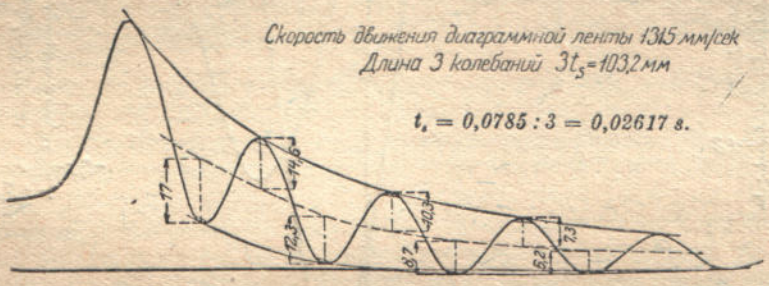



**Рис. 333.** Диаграмма по времени для определения массы и демпфирования индикатора, $^1/_2$ натур. величины.

чаются амплитуды. Эти амплитуды нанесены на чертеж; из них нужно вычесть или прибавить трение $w = 0{,}1$ *мм*; отсюда получается

$$\delta = \frac{17{,}0 - 0{,}1}{14{,}6 + 0{,}1} = 1{,}150, \text{ но точно так же и}$$

$$\delta = \frac{14{,}6 - 0{,}1}{12{,}3 + 0{,}1} = 1{,}170 \text{ и т. д., в среднем } \delta = 1{,}16, \text{ откуда}$$

$(\ln \delta)^2 = 0{,}0220$ — величина малая по сравнению с $\pi^2$.

При $t_s = 0{,}02617$ *сек* (рис. 333) получаем из уравнения (7):

$$m = \frac{2380 \cdot 0{,}000684}{4 \cdot (9{,}87 + 0{,}022)} = 0{,}0412 \ \frac{кГ \cdot сек^2}{м}, \text{ а из уравнения (8)}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{4 \cdot 2380 \cdot 0{,}0412 \cdot 0{,}0220}{9{,}87 + 0{,}022}} = 0{,}93 \ \frac{кГ}{м/сек}.$$

Рис. 334 дает способ *исправления диаграммы газовой машины* вблизи мертвой точки со стороны вспышки. Кривая *1* была индицирована; взятием производной по этой кривой была получена кривая скоростей *2*, взятием производной

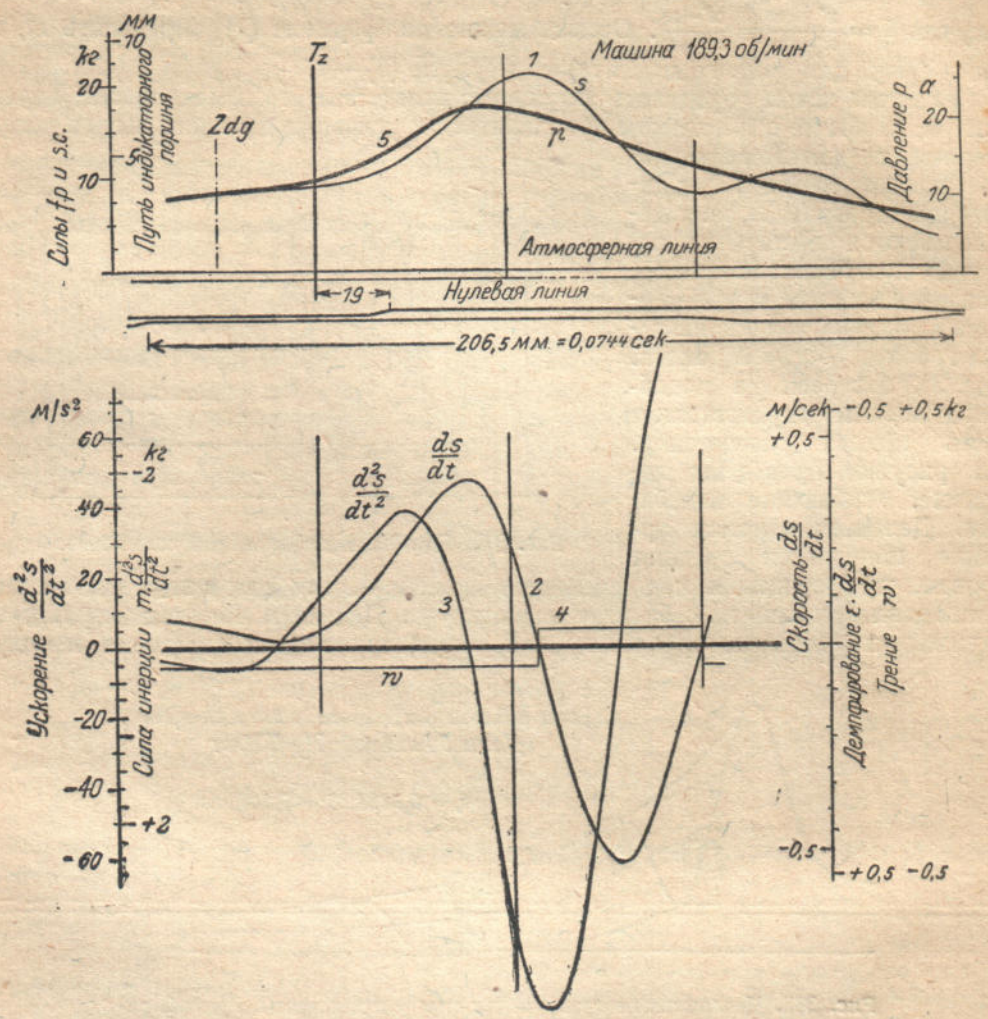



Рис. 334 и 335. Исключение влияния колеблющихся масс из диаграммы газовой машины, по Борту, $^1/_2$ натур. величины.

по кривой *2* получена кривая ускорений *3*. Эти кривые, в другом масштабе, начерчены под главной диаграммой (рис. 335). Принимая во внимание ранее определенное значение коэфициента затухания и массы, получили начерченные масштабы для величины затухания и сил инерции; трение нанесено так, что его можно непосредственно присчитывать к затуханию. Если, принимая во внимание масштабы и знаки, просуммировать кривые *2*, *3* и *4*, с кривой *1*, то получится, в виде кривой *5*, истинный ход давления *p* в индикаторном цилиндре. Высшее давление получилось другое, чем по диаграмме, снятой непосредственно; во всяком случае масса индикатора была преувеличена. На исправленной диаграмме колебания исчезли и истинная кривая давлений протекает совершенно

плавно. Легко видеть, что для равномерно протекающей кривой расширения истинная кривая давлений может быть хорошо определена, как средняя кривая между двумя огибающими, так что потребность в описанном подробном способе вычисления возникает лишь тогда, когда желательно изучить наивысшее давление и явления, связанные с получением последнего.

*Определение масштабов.* Вследствие передачи к пишущему штифту пути $s$ нанесены увеличенными в шесть раз; упругая постоянная пружины 2830 *кГ/м*, поэтому масштаб верхней фигуры 6000 *мм* = 2380 *кГ*, 1 *мм* = 0,397 *кГ* или 1 *кГ* = 2,52 *мм*. Масштаб ускорений вытекает из отдельных масштабов, всегда относимых к натуральной величине .(двойной против рисунка):

$$s: \ 0{,}01 \ м = 60 \ мм \text{ или } 1 \ мм = 0{,}000167 \ м$$
$$t: \ 0{,}0744 \ сек = 206 \ мм \text{ или } 1 \ мм = 0{,}000360 \ сек,$$

откуда

$$1 = \frac{0{,}000167}{0{,}000360} = 0{,}464 \ м/сек.$$

Эта скорость отвечает наклону кривой в 45°, тангенс которого равен 1. Мы можем выбрать масштаб для этой единицы по своему усмотрению; в качестве единицы мы принимаем 48 *мм*; тогда 48 *мм* = 0,464 *м/сек*; 1 *мм* = 0,00965 *м/сек* или 1 *м/сек* = 103,6 *мм*; при коэфициенте затухания E = 0,93 масштаб затухания будет 1 *мм* = 0,00965 · 0,93 = 0,00897 *кГ*, или 1 *кГ* = 111,5 *мм*. Соответственно вычисляются масштабы ускорений и сил инерции.

При подобных определениях у насосов необходимо принимать во внимание, что масса воды, соответствующая описываемому поршнем индикатора объему, принимает участие в движении, иначе поршень не будет двигаться. Эта масса воды должна вводиться в вычисления не в однократном размере. Вследствие большей частью недостаточных диаметров отверстий и потому увеличенных скоростей, массу воды приходится вводить в расчеты увеличенной в несколько раз. Если не принимать во внимание этой добавочной массы, то мы получим изменение давлений в индикаторном цилиндре, а не изменение давлений в цилиндре машины.

**§ 115. Особые применения индикатора**. Индикатор представляет самопишущий измеритель давлений или, когда он применяется для получения диаграммы по пути поршня, — измеритель работы. Но он допускает различные иные применения, при которых большое удобство представляет хорошая передача к пишущему штифту и удобная для градуировки и вычисления измерительная пружина.

В частности, индикатор может быть использован как самопишущий динамометр. Для этого измеряемую силу, развиваемую, например, на конце рычага тормозного нажима, заставляют, при помощи передающего стержня, действовать на поршень индикатора. Если при этом хотят сберечь поршень, то его заменяют направляющим стержнем, пригнанным к пружине и к гайке шарового сочленения. Диаграмма записывается на вращающемся барабане или на бумажной ленте; если бумагу пускать с постоянной скоростью, то получают $P$—$t$ диаграмму; планиметрированием площади $\int P dt$, ограниченной полученной кривой, можно получить количество движения $mv$, сообщенное или отнятое от движущейся массы $m$: $m \int dv = \int P \cdot dt$ (закон импульсов) [1].

Если же бумагу приводить в движение от вала машины, так чтобы она двигалась со скоростью, пропорциональной скорости движущихся масс, то получается $P$—s-диаграмма; планиметрированием площади, ограниченной полученной кривой, получается $\int P \cdot ds$, представляющий работу $A$, произведенную силой.

Возвращаясь к только что упомянутому случаю тормозного нажима, работающего с постоянной скоростью и при постоянной силе нажима, можно видеть, что диаграмма при этом обращается в прямую линию, а ограниченная ею площадь, служащая мерой работы, будет

[1] Это, конечно, относится к свободно движущимся массам, не преодолевающим никаких сопротивлений, — случай на практике не встречающийся. В упомянутом конкретном случае тормозного нажима, работающего при постоянной скорости и с постоянной приложенной к рычагу силой $P$, никакого изменения количества движения не происходит. (*Прим. перев.*).

равна $P \cdot s$, т. е. произведению силы на пройденный путь. Эта работа целиком превращается в теплоту, не вызывая приращения кинетической энергии движущихся масс.

В другом крайнем случае, при отсутствии каких бы то ни было сопротивлений, вся произведенная силой работа $\int Psd$ пошла бы на увеличение кинетической энергии движущихся масс $\frac{mv^2}{2}$. Тогда $\int Pds = \frac{m}{2}\left(v_2^2 - v_1^2\right)$. (*Прим. перев.*).

На сбегающей диаграммной ленте $P$—$s$-диаграммы может отмечаться время при помощи колеблющегося отметчика. Употребительные индикаторные пружины достаточны для измерения усилий до 60 *кГ*. Если требуется регистрировать большие силы или если эту регистрацию хотят произвести при помощи слабых пружин в увеличенном масштабе, то часть сил уравновешивается грузами; неуравновешенная часть силы затем регистрируется.

Дальше, при помощи индикатора можно записывать движение машинных частей, работающих принудительно или автоматически, как например, движение распределительных органов поршневой машины, вроде клапанов, золотников и кранов. Движение исследуемого органа передается при помощи нажимного стержня поршню индикатора, который обратно прижимается к стержню при помощи слабой пружины, которая и нужна только для прижимания поршня и масштаб который безразличен. Таким образом можно получить *диаграмму подъема клапанов* в виде диаграммы по пути поршня или в виде диаграммы по времени. Такая диаграмма по пути поршня, снятая с золотниковой машины, дает золотниковую эллиптическую диаграмму; при клапанном и крановом распределении получаются соответствующие кривые. Но так как при этом наиболее интересным является обыкновенно впуск и отсечка, которые часто лежат вблизи мертвых точек, и потому изображаются сокращенно и не отчетливо, то для изучения происходящих здесь явлений приходится снимать диаграмму по времени. По этой диаграмме посредством двукратного графического диференцирования можно определить действующие на распределительные органы силы таким способом, как это было показано для движений индикаторного поршня. Можно также снимать смещенные диаграммы подъема клапанов (рис. 331). Когда нельзя пользоваться шестикратной передачей, тогда пишущий штифт непосредственно соединяется с клапаном.

**§ 116. Особые конструкции индикаторов.** Для индицирования аммиачных холодильных машин индикаторы конструируются без бронзовых частей, из железа и стали, так как аммиак разъедает медные сплавы. В изображенном на рис. 286 индикаторе со сменными втулками, бронзовую втулку и всю нижнюю часть индикатора можно заменить стальной.

В случае необходимости, аммиачную машину можно индицировать и обыкновенным индикатором без заметных повреждений, если после снятия каждой диаграммы вынимать поршень и перед вставлением его снова хорошо смазывать компрессорным маслом.

Имеются индикаторы *для непрерывного снятия диаграмм*. Для исследования обстоятельств пуска машины в ход, а именно у транспортных машин и паровозов, желательно снимать диаграммы в течение всего времени пуска, так как каждая следующая диаграмма получается иною, чем предыдущая. Если длительно снимать диаграммы посредством обыкновенного индикатора, то диаграммы перекрывают друг друга, становится невозможно выделить отдельные диаграммы, в особенности невозможно установить их последовательность. При индикаторе, о котором идет речь, последовательные диаграммы снимаются на бумажной ленте умеренной длины, надеваемой на соответственно измененный барабан. Бумажный барабан получает попеременно возвратное движение, как и обыкновенно, от крейцкопфа, но в конце каждого хода бумажная полоса продвигается на несколько миллиметров вперед, так что отдельные диаграммы оказываются достаточно раздвинутыми одна от другой. Что касается подробностей конструкции барабана, для ознакомления с ними мы отсылаем к соответствующим проспектам.

К совершенно особым приемам приходится прибегать при конструировании индикаторов, которые можно было бы применять при *действительно высоких числах оборотов*. Трудности индицирования быстро возрастают с повышением числа оборотов, хотя, строго говоря, дело идет не столь о самом числе обо-

ротов, сколь о тех мгновенных скоростях, которые возникают при быстрых изменениях давления в индицируемом цилиндре. Таким образом, индицирование дизельмоторов оказывается возможным такими типами индикаторов и при таких числах оборотов, при которых индицирование моторов с зажиганием вследствие внезапного повышения давления после вспышки смеси, уже не дает удовлетворительных диаграмм.

Когда движения пишущего штифта из-за колебаний подвижных масс и неправильностей движения барабана вследствие ослабления шнура, дают ненадежную диаграмму, то можно помочь укорочением пути как пишущего штифта, так и барабана (§ 111 и 113).

В таких случаях лучше употреблять индикаторы особенно легкой конструкции (рис. 295). Все размеры уменьшены, для движущихся частей применен алюминий или дюралюминий. Пишущее коромысло профилировано. Все-таки при более высоких числах оборотов, даже при применении стали, возникают прогибы рычага.

Больше всех индикаторов укорочен путь *микроиндикатора* Мадера, у которого пишущий штифт соединен с поршнем без всякой увеличивающей передачи и своей иглой чертит диаграмму на закопченной стеклянной пластинке, приводимой в движение от крейцкопфа и совершающей движения в одной плоскости (не вращаясь) (Л.). Размеры диаграмм в обоих направлениях не превышают немногих миллиметров и измеряются посредством измерительного микроскопа; в случае надобности, диаграммы могут быть увеличены фотографическим путем. Но тонкость штрихов, какую возможно получить на закопченной пластинке, не кажется достаточной, чтобы при соответствующем увеличении получить удовлетворительную точность. С другой стороны, были попытки (Л.) чертить такие диаграммы чрезмерно тонкими штрихами — алмазом на стекле.

При помощи таких конструкций, инерция может быть уменьшена, но не устранена по существу, и при высоких числах оборотов, свыше 800—1000, она всегда еще сказывается, так что диаграммы могут быть использованы скорее качественно для улучшения работы органов зажигания, чем количественно для определения мощности. Для первой цели может служить диаграмма по времени, при которой, по крайней мере в направлении абсцисс, можно полностью избежать инерционных воздействий.

В последнее время стараются устранить инерцию движущихся масс так же, как это сделано в динамометрах, описанных в § 97 и 103. В *емкостном индикаторе* (рис. 336) индицируемое давление действует на мягкую латунную мембрану и посредством стержня на измерительную сменную мембрану из плоской пружинной стали. Малые перемещения мембраны вызывают изменения электростатической емкости по отношению к массивной изолированной противоположной пластинке. Изменения емкости измеряются по схеме половинного резонанса, соответственно усиливаются, выпрямляются и записываются при помощи осциллографа. Латунная мембрана сама по себе не нужна: она должна исключать необходимость передачи изменений давления вдоль канала до измерительной мембраны, так как вследствие демпфирования длинного и узкого канала (§ 111) возникает разница между давлениями в индикаторном пространстве и в цилиндре машины; затем она должна предохранять измерительную мембрану от нагревания. Пьезоэлектрические индикаторы или работающие с угольными сопротивлениями также применяются. Они так компактны, что могут проходить в отверстие для зажигательной свечи автомобиля.

Для исключения инерционного действия масс может служить также принцип *индицирования по точкам*.

Механический точечный индикатор Джугаша (Л.). вводит перед индикатором вращающийся двойной золотник, который сообщает внутреннее пространство индикатора с цилиндром только в одной точке каждого хода. Поэтому в нем устанавливается давление, одинаковое с давлением в цилиндре в этой точке хода поршня. Эту определенную точку хода можно устанавливать от руки, причем одновременно перестанавливается и индикаторный барабан. Таким образом, на индикаторном барабане медленно очерчивается диаграмма, неоднократно пробегаемая за этот промежуток времени машиной.

Показания будут правильными лишь при условии, что индикаторный поршень плотно прилегает к стенкам. Чтобы устранить эту возможность ошибки, при точечном индикаторе Гастерштедта пользуются как вспомогательным средством сжатым воздухом. Перед маленьким, ведущим к каналу индикатора, отверстием подвешена маленькая крышечка, которая может колебаться с ходом в 0,1 *мм*. При подъеме и падении давления в цилиндре эта крышечка всегда меняет свое положение в момент выравнивания давления с давлением снаружи

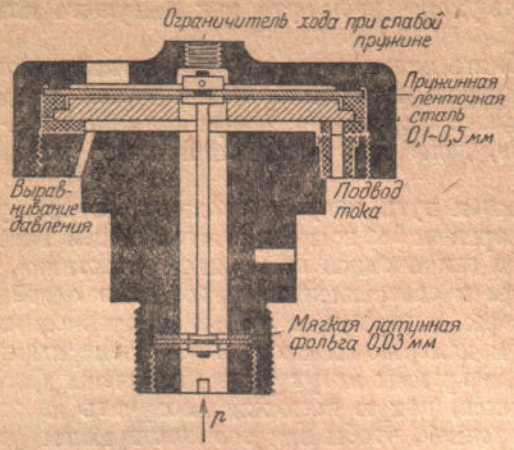



Рис. 336.

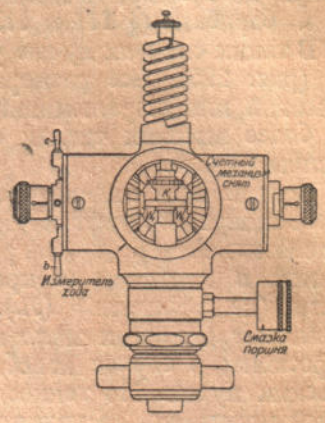



Рис. 337.

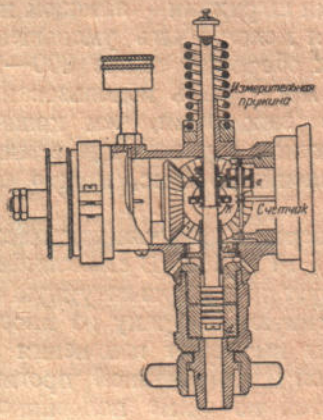



Рис. 338.

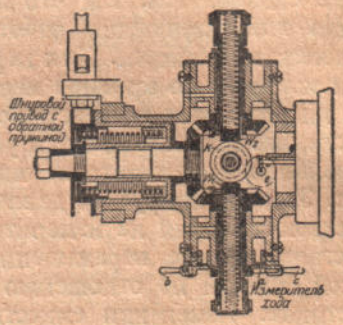



Рис. 339.

Рис. 336. Кондерсаторный индикатор *DV'L*, по Шнауферу, натур. величина. Собственная частота 2500 *гц*.

Рис. 337—339. Счетчик работы Гюмбеля фабрики Леман и Михельс.

крышечки. Если теперь во внешнем пространстве устанавливать *различные* давления, которые можно отсчитывать, а с другой стороны посредством контакта при определенном угле поворота кривошипа заряжать — в зависимости от положения крышечки — тот или другой из двух электроскопов, то любому положению кривошипа машины, а следовательно, и поршня можно приписать определенное давление в цилиндре.

**§ 117. Счетчики работы.** Индикатор позволяет определить баланс работы одного определенного рабочего цикла поршневой машины. По результатам планиметрирования можно найти работу, доставленную машиной за определенное время, если принять, что снятые диаграммы дают среднее значение работы.

Всегда может случиться, что при сильно и неравномерно колеблющейся нагрузке невозможно снять достаточно много диаграмм, чтобы получить достоверное среднее значение. Кроме того, затрата времени на планиметрирование многочисленных диаграмм становится значительной.

Поэтому были созданы приборы, которые позволяют в течение определенного промежутка времени измерять доставляемую поршневой машиной работу таким образом, что по счетчику всегда можно прочесть полную, доставленную к любому моменту времени работу точно так же, как водомер дает полное пропущенное им количество воды.

Приборы, о которых идет речь, иногда называют счетчиками мощности. Такое наименование неправильно, так как отсчитывается не мощность, а интегральное значение последней — работа.

В русском языке в последнее время укореняется другое слово — *работомер*, которое весьма легко по смыслу смешать со счетчиком работы. Работомеры получают большое распространение в связи с диспетчеризацией промышленности и служат для автоматического учета фактического *рабочего времени станка* или машины или, наоборот, его простоев и холостого хода, тогда как счетчики работы суммируют механическую работу или энергию (*Прим. перев.*).

*Счетчик работы* для поршневой машины изображен на рис. 337—339. Получение произведения из силы на путь происходит благодаря взаимодействию двух работающих совместно как фрикционный привод дисков, силового ролика и диска пути. Последних имеются два — $W_1$ и $W_2$, оба они связаны конической зубчатой передачей, вращаются в противоположных направлениях и не дают никакой внешней составляющей по отношению к силовому ролику $K$, к которому они прижимаются с одинаковой силой нажимными пружинами. Диски пути приводятся в такое же движение, каким движется точка приложения силы. При поступательном движении они вращаются соответственно в одном направлении, при поршневых машинах им сообщается попеременно возвратное вращательное движение посредством шнурового привода, который подобно шнуровому приводу индикатора присоединяется к крейцкопфу машины и приводит в движение коническую передачу. Пружина возвратного движения служит для той же цели, как и в барабане индикатора. Силовой ролик движется между лобовыми поверхностями дисков пути, а именно, как видно на рис. 340, он под влиянием измеряемой силы движется по направлению одного из диаметров по поверхности диска пути, которого он, будучи выпукло обточен, касается в одной точке. Это движение сообщается силовому ролику индикаторным механизмом с поршнем на одной стороне и измерительной пружиной на другой. Отклонения от нулевого положения будут пропорциональны действующим на поршень силам, а следовательно и давлениям.

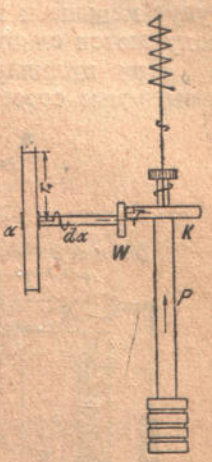


Рис. 340. Принцип счетчика работы.

Силовой ролик приводится во вращение диском пути посредством трения и угол его поворота будет пропорционален скорости диска пути, а следовательно и поршня машины. Он также будет зависеть и от соответствующего расстояния точки касания дисков от центра диска пути, поэтому и от господствующего в цилиндре давления. Обороты силового ролика посредством зубчатой передачи передаются счетчику; посредством длинной шестерни $e$ обеспечивается постоянное сцепление, несмотря на непрерывные движения силового ролика.

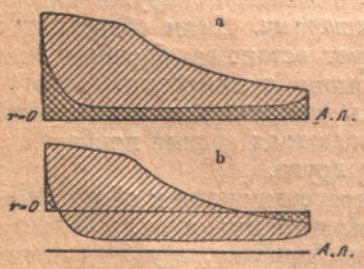


Рис. 341. К теории счетчика работы.

Специальный измеритель хода (рис. 339) является необходимым в том случае, если иным путем нельзя определить длины диаграммы, т. е. приведенного хода поршня машины, принимая в расчет вытяжки шнура. Особый захват раздвигает штифты $b$ и $c$ тем дальше друг от друга, чем больше ход диска пути.

Когда давление равно нулю, силовой ролик не должен устанавливаться точно на центр диска пути. Передвижение счетчика всегда соответствует произведению разности давлений при прохождении вперед и назад элемента пути

$ds$ и величины этого пути $ds$. Атмосферная линия играет в данном случае столь же малую роль, как и при вычислении индикаторных диаграмм.

Тем не менее не безразлично, какое давление соответствует положению силового ролика в центре диска пути. На рис. 341 изображен путь получения окончательных результатов для двух случаев. На рис. 341*а* установка силового ролика $r = 0$ совпадает с атмосферной линией. Тогда при ходе вперед будет зарегистрирована площадь, заштрихованная правой штриховкой, а при обратном ходе — площадь, заштрихованная левой штриховкой. Из первой площади должна быть вычтена вторая и, таким образом, исключается перекрестно заштрихованная поверхность, а остается только часть, заштрихованная правой штриховкой. Если нулевое положение силового ролика $r = 0$ передвинуть выше атмосферной линии настолько, как это показано на рис. 341*б*, то результаты будут правильнее: теперь только маленькие накрест заштрихованные площадки должны быть обведены один раз при ходе вперед, другой раз при обратном; поэтому и обратное вращение силового ролика и счетчика будет меньше, а следовательно будут меньше и инерционные действия масс. Если итти еще дальше, то снова получаются слишком большие, накрест заштрихованные площади.

При цилиндрах высокого давления паровой машины также получаются невыгодные сооотношения, если нулевое положение силового ролика выбирать на атмосферной линии. Напротив того, при четырехтактных нефтяных двигателях нулевое положение следует выбирать лишь немного выше атмосферной линии, так как, хотя силовая часть диаграммы и высоко подымается над атмосферной линией, зато диаграмма всасывания держится близко по обе стороны атмосферной линии.

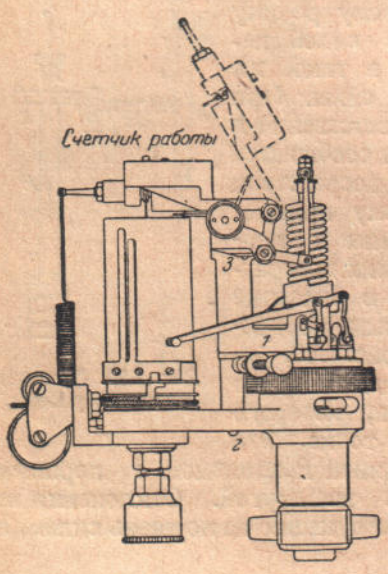


Рис. 342. Счетчик работы Бохтера, фабрики Майгак.

*Область применения* таких счетчиков работы — это эксплоатация машин. Особенно при дизельмашинах для неэлектрического привода такие счетчики дают возможность контроля расхода горючего. Условием применения их является возможность длительной эксплоатации. Поэтому обязательным является хорошее осуществление смазывающих устройств для движущихся частей. На рис. 337 можно видеть особое устройство для смазки цилиндра. Во всяком случае для этого было пожертвовано свободной подвижностью сменной цилиндровой втулки, так как она в точке $d$ (рис. 338) прочно опирается на буртик; при этом втулка также не омывается снаружи паром.

*Счетчики работы соединяются* также *с индикаторами*. Этим сберегаются некоторые части. Снятие отдельных диаграмм требует остановки барабана для надевания бумаги, что не дает возможности непрерывно суммировать работу, поэтому обе задачи вполне целесообразно разделять между двумя различными приборами. При помощи двойного крана можно пользоваться обоими приборами, которые при этом остаются независимыми друг от друга.

На рис. 342 показан счетчик работы, который присоединяется к обыкновенному индикатору: часть индикатора *1* связана с крышкой цилиндра, у *2* части при помощи штифта счетчик фиксируется на мостике барабана, а у *3* — он несет собственно счетчик. При этом, силовой ролик совместно с корпусом счетного механизма передвигается по лобовой поверхности барабана, как по диску пути. Отсчет производится на верхней стороне счетчика, который спиральной пружинкой прижимается к барабану, но для надевания на барабан бумаги может быть откинут в положение, изображенное пунктиром.

Такие счетчики работы с попеременно возвратным движением все же имеют сравнительно малое распространение [1].

[1] До конца главы написано переводчиком.

Зато с быстрым распространением моторной тяги в сельском хозяйстве особое значение приобретают счетчики работы, которые можно включать между трактором и прицепляемыми к нему орудиями. Такие счетчики дают не индикаторную работу, как предыдущие, а фактическую, эффективную работу на крюке, ту полезную работу, которую отдает трактор машине-орудию.

Все такие счетчики повторяют в принципе конструкцию непрерывного индикатора Теодоровича, прибора впервые сконструированного у нас в конце прошлого столетия для изучения работы тяги паровоза.

Ввиду большого значения, которое приобретает изучение работы тракторов и вообще механизированной тяги, мы даем теорию ошибок такого дискового счетчика работы.

Все такие счетчики состоят из диска *1*, рис. 342а, приводимого в движение от колеса прицепного орудия или повозки посредством какой-либо передачи; число оборотов диска поэтому всегда пропорционально пройденному пути. По диску двигается фрикционный ролик *2*, связанный с динамометром, расположенным межу трактором и прицепом таким образом, что перемещение ролика по диску всегда пропорционально показанию динамометра. Число оборотов следовательно пропорционально силе тяги на крюке.

Особенно удобно такая связь осуществляется при гидравлических динамометрах, но такие счетчики легко связываются и с простыми пружинными динамометрами. Ролик *2* может передвигаться по диску *1* по направлению его радиуса и, при усилии, равном нулю, касается диска в его центре.

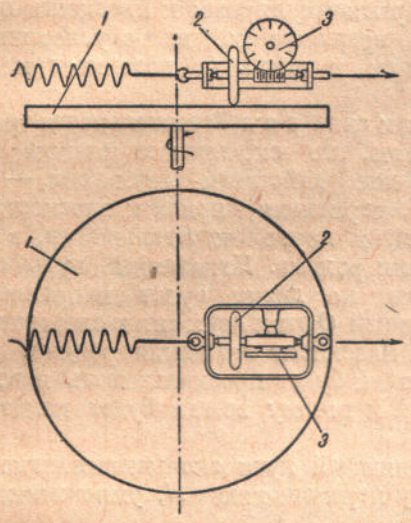



Рис. 342а. К теории счетчика работы.

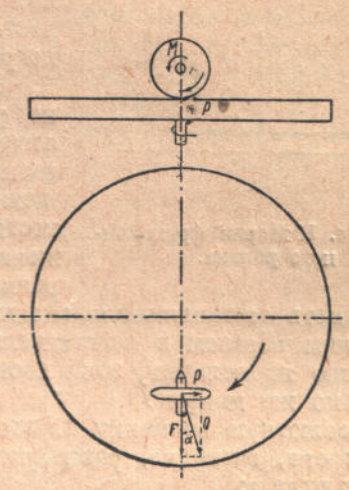



Рис. 342b. К теории фрикционного ролика.

При трогании с места диск приходит во вращение, а ролик смещается с центра диска и, благодаря трению о диск, сам приходит во вращение.

При любом данном положении ролика на диске, число оборотов ролика будет пропорционально как угловой скорости диска, так и расстоянию точки касания от центра диска, т. е. будет пропорционально произведению обеих этих величин.

Как указано выше, угловая скорость или число оборотов диска пропорциональны пройденному трактором пути, а смещение ролика с центром диска пропорционально усилию на крюке или, что то же, усилию, передаваемому трактором прицепу.

Таким образом, число оборотов ролика всегда пропорционально произведению силы тяги на пройденный путь, т. е. действительной работе, передаваемой трактором машине-орудию или повозке.

Поэтому счетчик *3*, связанный с роликом, всегда будет показывать в соответствующем масштабе полную сумму работы, полученной орудием от трактора.

При соответствующем выборе передачи и масштаба, эта работа может непосредственно выражаться в килограммометрах или лошадиных силах - часах или в киловаттчасах. Эта элементарная теория будет вполне точна только при условии отсутствия какого-либо сопротивления вращению ролика 2 на оси.

В случае же наличия такого неизбежного сопротивления, возникает погрешность, величина которой при известных условиях может стать значительной и даже совершенно недопустимой.

Даем вывод этой погрешности. Ролик радиуса $R$ оказывает при своем вращении некоторое сопротивление, измеряемое моментом $M$. Момент этот зависит как от трения на оси ролика, так и от сопротивления всего передаточного механизма. Этот момент развивает в точке касания некоторую силу $p$, направленную навстречу движения диска и ролика $M = pR$.

Если ролик не изменяет своего расстояния от центра диска и, следовательно, движение его сводится к чистому качению и пока сила $p$ меньше силы трения между диском и роликом, то никакого скольжения в плоскости вращения ролика не наблюдается и не возникает никакой погрешности.

Если диск стоит неподвижно и ролик передвигается по радиусу диска, т. е. путь скольжения перпендикулярен к плоскости вращения ролика, то слагающая скольжения в этой плоскости равна нулю, и ролик не вращается, как это и должно быть.

Если при этом диск вращается, но сила $p$ (сопротивление в плоскости вращения ролика) равна нулю, то опять-таки путь скольжения ролика по диску не меняет своего направления, остается перпендикулярным к плоскости вращения ролика, вращение ролика обусловливается чистым катанием и опять не возникает никакой погрешности.

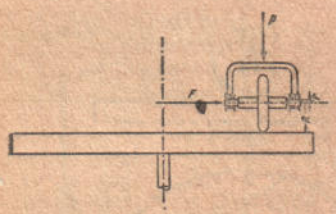


Рис. 342с. К теории фрикционного ролика.

Но так как сила $p$ в действительности никогда не равна нулю, то скольжение ролика будет совершаться под действием двух сил, — одной радиальной $F$, перпендикулярной к плоскости вращения ролика, и другой касательной $p$, в плоскости вращения ролика. Мгновенный путь скольжения ролика по диску будет направлен по равнодействующей $Q$ этих двух сил и следовательно будет иметь составляющую скольжения в плоскости вращения ролика.

Таким образом в действительности ролик будет проскальзывать навстречу движению на величину этой составляющей и потому всегда будет показывать настолько же меньше.

Абсолютную величину $\Delta s$ этой составляющей пути скольжения легко определить; она, очевидно, равна радиальному перемещению $\Delta N$, умноженному на тангенс угла $\alpha$:

$$\Delta s = \Delta N \cdot \operatorname{tg} \alpha = \Delta N \frac{p}{F}.$$

Уменьшать эту абсолютную погрешность уменьшением $\Delta N$ нельзя, так как относительная погрешность останется при этом без перемены, вследствие одновременного уменьшения и полезного пути катания, следовательно нужно стремиться к уменьшению $\operatorname{tg}\alpha$.

Дробь $\frac{p}{F} = \operatorname{tg}\alpha$ можно уменьшить или уменьшением числителя $p$ или увеличением знаменателя $F$. Последний путь не подходит, не только потому, что это увеличит погрешность в показании динамометра (эта погрешность при сильной пружине может быть сравнительно невелика), но главным образом потому, что при увеличении $F$ одновременно возрастает и $p$.

Таким образом, остается только уменьшение $p$.

Как было указано, $M = pR$, где $M$ — момент, тормозящий вращение ролика и $R$ — радиус его. Отсюда $p = \frac{M}{R}$. Момент сопротивления $M$ слагается из момента трения $Mf$ на оси ролика и момента, обусловливаемого сопротив-

лением счетчика. Последний всецело зависит от конструкции счетчика и может и должен быть сделан возможно малым.

Что касается момента трения $Mf$, то он существенно зависит от способа прижатия ролика к диску.

Ролик может прижиматься к диску пружиной, как в счетчике работы Боттхера (рис. 342), тогда нажатие производится *через ось и цапфы* ролика; или, как в счетчике Гюмбеля (рис. 337), нажатие производится вторым парным диском, не нагружая, по крайней мере в теории, цапф и оси ролика.

Рассмотрим оба случая. Обозначим через $R$ — радиус ролика, через $r$ — радиус его оси, через $\varphi_d$ — коэфициент трения ролика по диску, через $\varphi_0$ — коэфициент трения цапф в опорах и через $P$ — силу, прижимающую ролик к диску.

Тогда сила трения ролика по диску, а следовательно и сила, необходимая для его радиального передвижения, будет $F = \varphi_d P$; сила трения в цапфах ролика — $\varphi_0 P$; сила трения с торцевой пяте оси ролика будет $\varphi_0 F$; момент трения ролика — $Mf = \varphi_0 Pr + F\varphi_0 rk$.

Когда ролик прижимается вторым диском, давление $P$ передается непосредственно телом ролика, минуя цапфы, первый член отпадает и

$$M_f = \varphi_0 Frk = \varphi_d \varphi_0 Prk.$$

Здесь $k$ — коэфициент, зависящий от конструкции упорной пяты. При обыкновенной торцевой пяте $k = \frac{2}{3} = 0{,}67$, следовательно, член $\varphi_d \varphi_0 Prk$ значительно меньше.

Однако, значительные теоретические преимущества такой передачи давления вспомогательным диском практически не так велики, так как и цапфы и трение в них все таки остаются, а некоторые конструктивные неудобства еще более умаляют эти выгоды, поэтому такая конструкция, как в счетчике Гюмбеля, встречается редко, и в большинстве тяговых счетчиков, счетчике Боттхера и в целом ряде других приборов мы имеем дело с одиночным диском и с односторонним нажимом.

Подставляя в $\operatorname{tg}\alpha = \frac{p}{F}$ полученные выражения, получим

$$p = \frac{M_f}{R} = \frac{\varphi_0 Pr(1 + \varphi_d k)}{R}; \; F = P\varphi_d$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{r}{R}\,\frac{\varphi_0(1 + \varphi_d k)}{\varphi_d} = \frac{r}{R}\,\frac{\varphi_0}{\varphi_d}(1 + \varphi_d k).$$

Величина абсолютной погрешности $\Delta s = \Delta N \cdot \frac{r \cdot \varphi_0}{R\varphi_d}(1 + \varphi_d k)$.

Также для приборов с парными дисками $\Delta s = \Delta N \cdot \frac{r}{R}\,\varphi_0 k$.

Из этих выражений для абсолютного пути скольжения видно, что погрешность при данном $\Delta N$ непосредственно зависит, во-первых, от отношения $\frac{r}{R}$, т. е. радиуса оси ролика к радиусу самого ролика, во-вторых, от коэфициента трения $\varphi_0$ на оси ролика или его отношения к коэфициенту трения ролика по диску $\frac{\varphi_0}{\varphi_d}$. При стальном диске и ролике этот коэфициент $\varphi_d$ будет $\sim 0{,}2$ и рассчитывать на дальнейшее повышение не приходится. Для остальной оси в агатовых опорах, со смазкой костяным маслом, можно рассчитывать на $\varphi_0 = 0{,}06$ до 0,02.

Принимая $\varphi_0 = 0{,}04$, получаем для $\frac{\varphi_0}{\varphi_d} = \frac{0{,}04}{0{,}2} = 0{,}2$, принимая $K = 0{,}7$, получаем $\Delta s = \Delta N \cdot 0{,}2\,(1 + 0{,}2 \cdot 0{,}67)\,\frac{r}{R} = \Delta N \cdot 0{,}23\,\frac{r}{R}$. То же для парных

дисков:

$$\Delta s = \Delta N \cdot 0{,}04 \cdot K \frac{r}{R}.$$

Отсюда видно, что точность работы счетчика непосредственно определяется отношением $\frac{r}{R}$: чем это отношение меньше, тем меньше и абсолютная погрешность.

Поэтому радиус оси, вернее цапф, ролика следует делать настолько малым, насколько допускают условия прочности.

До сих пор мы говорили об абсолютном скольжении ролика по диску; между тем для относительной точности, которая только и должна нас интересовать, имеет значение не абсолютная величина пути скольжения, а его отношения к полезному пути катания, зависящего от скорости вращения диска. Как видно из формулы, абсолютный путь скольжения не зависит от пути катания, а только от величины радиального перемещения ролика по диску, т. е. от ординаты диаграммы; поэтому, увеличивая путь катания или скорость диска, т. е. абсциссу, мы можем неограниченно понижать относительную погрешность.

Такое увеличение числа оборотов диска у приборов типа тракторных счетчиков, с постоянным направлением вращения диска, не представляет затруднений, у приборов же типа Гюмбеля, с попеременно возвратным движением, ограничивается влияние движущихся масс и кроме того, по конструктивным соображениям, размах обычно делается меньше полного оборота.

Такое ограничение не является необходимым и, давая диску размах в несколько оборотов на каждый ход, легко значительно повысить точность прибора.

Пользуясь указаниями изложенной теории, можно легко построить счетчики с наперед заданной точностью.

Между тем, многие существующие конструкции счетчиков далеко уклоняются от требований теории.

Примером может служить тот же счетчик Гюмбеля.

Как видно по рис. 338, $\frac{r}{R}$ у него близко к $^1/_2$ ($r$ — радиус шарикового подшипника ), $k = 1$ — отношение размаха диска к радиальному ходу ролика $\frac{\Delta D}{\Delta N}$ (абсциссы к ординате) также не более двух. Принимая для трения в шариковом кольце тоже значение $\varphi_0 = 0{,}04$, получим, по формуле

$$\frac{\Delta s}{\Delta N} = \frac{\Delta N}{\Delta D} \cdot \frac{r}{R} \cdot \varphi_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 0{,}04 = 0{,}01.$$

Сопротивление, развиваемое весьма грубой скользящей передачей к счетчику и самым счетчиком, несомненно значительно превышает сопротивление самого ролика; даваемый формулою результат необходимо удвоить или утроить, и общая погрешность в лучшем случае будет не менее 0,02—0,03, т. е. от 2% до 3%, тогда как, соблюдая указанные правила, легко получить значительно высшую точность.

У счетчика, подобного счетчику Боттхера, без вспомогательного диска, при диаметре ролика 30 *мм* цифры ролика свободно могут быть не толще 1 *мм*, что дает $\frac{r}{R} = 0{,}03$; поставив счетчик, подобный счетчику планиметра, можно рассчитывать, что его сопротивление не превысит 50% сопротивления самого ролика.

При этих значениях получается отношение

$$\frac{\Delta s}{\Delta D} = 0{,}23 \cdot 0{,}03 \cdot 1{,}5 = 0{,}006 \text{ или } 0{,}6\%.$$

При счетчиках с непрерывным вращением диска (в одном направлении), как у тракторных счетчиков, отношение $\Delta$ к $\Delta N$ может быть сделано значительно более выгодным.

Кроме того, у них ролик не должен, как у первых, обязательно за каждый оборот делать ход туда и назад по радиусу диска. При постоянном усилии тяги ролик даже может стоять на неизменном расстоянии от центра, а в таком случаев, как было разъяснено, вовсе не возникает никакой погрешности от скольжения.

Поэтому среднее отношение пути скольжения к пути катания у счетчиков с непрерывным направлением вращения всегда значительно лучше, чем у счетчиков типа Гюмбеля.

Таким образом, у тракторных счетчиков можно погрешность от скольжения свести почти на нет и точность счетчика будет определяться лишь точностью динамометра.

Погрешность же в 3% для счетчика Гюмбеля еще очень и очень хорошая цифра и может достигаться лишь при внимательном уходе. Нередко приходится встречать другие аналогичные приборы, дающие из-за несоблюдения указанных правил, погрешности до 20% и выше.

Изложенная теория ошибок непосредственно применена не только к счетчикам работы, но и ко всем многочисленным приборам с фрикционным роликом, вплоть до планиметров [1].

---

[1] Настоящая теория разработана пишущим эти строки и появляется в печати впервые. (*Прим. перев*).

# X. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

**§ 118. Единицы.** Температура вместе с удельным объемом и давлением является основным параметром, определяющим состояние тела. Говорят, что два тела $A$ и $B$ одинаково нагреты, если при взаимном соприкосновении не наблюдается никакого перехода тепла или если от $B$ к $A$ переходит столько же теплоты, сколько от $A$ к $B$. Но это обычное утверждение в отношении твердых и жидких тел соответствует только предельному случаю исчезающе малых давлений пара. У влажного термометра психрометра теплообмен с окружающим воздухом не приводит к равенству температур термометра и воздуха, хотя количество тепла, приносимое воздухом, отдается термометром с испаряющейся водой. Все это дает только понятие о температуре, но не меру для определения ее равенства или неравенства. Цейнер математически формально вводит в уравнения теплоты значение температуры как интегрирующего множителя, чтобы перевести термодинамически неопределенное количество теплоты в термодинамически определенную энтропию. Кельвин определил температурную шкалу, исходя из второго начала термодинамики таким образом, что совершающийся между двумя какими-нибудь температурами обратимый круговой процесс должен иметь коэфициент полезного действия, равный $\frac{T-T_0}{T_0}$. В Советском Союзе с 1-го февраля 1934 г. принята международная стоградусная температурная шкала, основанная на термодинамической шкале. Приводим положение о температурной шкале (ОСТ 6954).

| МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ШКАЛА | ОСТ / ВКС 6954 |
|---|---|

А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ

«1. Международная температурная шкала, принятая VIII генеральной конференцией по мерам и весам в 1933 г., является практическим осуществлением термодинамической стоградусной температурной шкалы, у которой температура плавления льда и температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении обозначены соответственно через 0° и 100°.

Примечание. Нормальное атмосферное давление равно давлению ртутного столба в 760 *мм* высоты на его горизонтальное основание при плотности ртути 13,5951 $g/см^3$ и при нормальном ускорении свободного падения 980,665 $см/sec^2$ (ОСТ/ВКС 5859).

2. Международная температурная шкала основывается на системе постоянных точно воспроизводимых температур равновесия (постоянных точек), которым присвоены числовые значения. Для определения промежуточных температур служат интерполяционные приборы, градуированные по этим постоянным точкам.

Б. ОБОЗНАЧЕНИЕ

3. Температуры, измеряемые по международной шкале, обозначаются знаком °С (например, 960,5° С).

## В. ОСНОВНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ТОЧКИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ

4. Основные постоянные точки и присвоенные им числовые значения при нормальном атмосферном давлении, равно как и формулы, представляющие температуру $t_p$ как функцию давления пара $p$, приведены в нижеследующей таблице.

**Таблица основных постоянных точек международной температурной шкалы**

| | |
|---|---|
| а) Температура равновесия между жидким и газообразным кислородом при нормальном атмосферном давлении (точка кипения кислорода) . . . . . | — 182,97° |
| $t_p = t_{760} + 0{,}0126\ (p - 760) - 0{,}0000065\ (p - 760)^2$ | |
| б) Температура равновесия между льдом и насыщенной воздухом водой при нормальном атмосферном давлении (точка плавления льда) . . . . . | 0,000° |
| в) Температура равновесия между жидкой водой и ее паром при нормальном атмосферном давлении (точка кипения воды) . . . | 100,000° |
| $t_p = t_{760} + 0{,}0367\ (p - 760) - 0{,}000023\ (p - 760)^2$ | |
| г) Температура равновесия между жидкой серой и ее паром при нормальном атмосферном давлении (точка кипения серы) . . . | 444,60° |
| $t_p = t_{760} + 0{,}0909\ (p - 760) - 0{,}000048\ (p - 760)^2$ | |
| д) Температура равновесия между твердым и жидким серебром при нормальном атмосферном давлении (точка затвердевания серебра) . . . . . | 960,5° |
| е) Температура равновесия между твердым и жидким золотом при нормальном атмосферном давлении (точка затвердевания золота) . . . . . | 1063,0° |

## Г. ОБЛАСТИ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

5. Для целей интерполяции температурная шкала подразделяется на четыре области.

а) От точки плавления льда до 660° С температура $t$ выводится из сопротивления $R_t$ эталонного платинового термометра сопротивления при помощи формулы:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2). \qquad (1)$$

Постоянные $R_0$, $A$ и $B$ определяются путем наблюдений в точке плавления льда и в точках кипения воды и серы.

б) от — 190° С до точки плавления льда температура выводится из сопротивления $R_t$ эталонного платинового термометра сопротивления при помощи формулы:

$$R_t = R\ [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]. \qquad (2)$$

Постоянные $R_0$, $A$ и $B$ определяются, как указано выше, по формуле (1), а дополнительная постоянная $C$ получается по формуле (2) из наблюдений в точке кипения кислорода.

Чистота и физические свойства платины, из которой изготовляется термометр, должны быть таковы, чтобы отношение $R_t/R_0$ не было меньше 1,390 для $t = 100°$ С и 2,645 для $t = 444{,}60°$ С.

У эталонного термометра при употреблении его ниже 0° С, кроме того отношение $R_t/R_0$ должно быть меньше 0,250 для $t = -183°$ С.

в) От 660° С до точки затвердевания золота температура $t$ выводится из электродвижущей силы $e$ эталонной платина-платинородиевой термопары, один спай которой удерживается при постоянной температуре в 0° С, а другой подвергается действию температуры $t$, определяемой формулой:

$$e = a + bt + ct^2. \qquad (3)$$

Постоянные $a$, $b$ и $c$ определяют, подвергая термопару действию температур в точках затвердевания сурьмы, серебра и золота.

Примечание. Температура затвердевания образца сурьмы, применяемого для градуировки, устанавливается особо при помощи эталонного платинового термометра сопротивления.

г) Выше точки затвердевания золота температура определяется отношением силы света $I_2$ видимых монохроматических лучей длины волны $\lambda$, испускаемых черным телом при температуре $T_2$ к силе $I_i$ лучей той же длины волны, испускаемых черным телом при температуре плавления золота.

Формула:

$$\ln \frac{I_2}{I_i} = \frac{C_2}{\lambda}\left(\frac{1}{1336} - \frac{1}{t+273}\right), \qquad (4)$$

в которой величина $C_2$, равна 1,432 *см*-градусам, служит для определения $t$, когда $(t + 273)\lambda$ меньше 0,3 *см*·градус.»

Абсолютная температурная шкала или шкала Кельвина имеет свою нулевую точку при — 273,2° С, таким образом точка замерзания воды находится при 273° К (округленно) и нормальная точка кипения при 373° К. Вопрос об отрицательных значениях абсолютной температуры таким образом отпадает, так как — 273° С является нижним теоретическим пределом общей температурной шкалы. Выраженную в установленной шкале температуру обозначают через $t$° С, а температуру, выраженную в градусах абсолютной шкалы — через $T$; тогда, следовательно $T = 273 + t$.

Температура, отсчитываемая в градусах абсолютной шкалы, обозначается через °К в честь лорда Кельвина.

В формулах размерности часто приходится выписывать полностью слово «градус». Установление размерности температуры вызывает затруднения, в виду того, что в технической системе или системе *CGS* ее размерность не установлена. В основных формулах, как например, уравнении Клапейрона, указывается лишь отношение температур, так что из него нельзя вывести размерности температуры. Без особых на то оснований температуру следует рассматривать как безразмерное число.

Международная температурная шкала принята во всех главнейших странах, в том числе СССР, Англии, Франции, США, Германии и др. В странах же, в которых говорят по-английски, применяется также и температурная шкала Фаренгейта. По этой шкале точка замерзания воды обозначается 32° Ф, точка кипения воды при нормальном барометрическом давлении (760 *мм* ртутного столба) обозначается 212° Ф, причем по аналогии с угловым делением расстояние между постоянными точками разделено на 180 градусов.

Следовательно,

$$°C = \frac{5}{9} \cdot (°Ф - 32);$$

$°Ф = \frac{9}{5}°C + 32$. В шкале Фаренгейта абсолютная температура (Л.) равна $T°Ф = °Ф + 459{,}6$; температура при точке таяния льда $T°Ф = 492$, при нормальной точке кипения $T°Ф = 672$ (таблица 34).

Согласно ОСТ 349 за нормальную температуру должна приниматься температура не 0° С, а 20° С. Это в первую очередь относится к мерам длины и объема. Наоборот 0° С принята как нормальная температура при определении метра и ома, а также и для ртути при измерении давления, 4° С принята как нормальная температура при определении отношения килограмма к литру воды. О нормальном состоянии газов при указании их количества как объемов упомянуто в § 4.

В США температура в 68° Ф = 20° С, принята как нормальная (см. таблицу 34).

**§ 119. Жидкостные термометры.** Общеизвестен ртутный термометр, состоящий из ртутного шарика и столбика в капилляре со шкалою вдоль него. В на-

стоящее время термометры изготовляются преимущественно из иенского стекла $16^{III}$, отличающегося по вплавленной красной полоске [1] и известной незначительным термическим последействием. Стеклянная трубка, содержащая ртутный столбик, в верхней части обычно имеет расширение, куда входит ртуть при превышении максимальной показываемой термометром температуры, в противном случае термометр должен был бы лопнуть. Если ртуть при снижении температуры случайно останется в этом расширении, то показания термометра становятся неправильными. Последнее имеет место также, когда ртутный столбик в стеклянной трубке разделяется, что возможно от загрязненности ртути или из-за плохого удаления воздуха из трубки. Эти оба явления можно избежать и устранить следующим образом. Термометр необходимо быстро вращать по кругу шариком наружу, вследствие чего центробежная сила подгоняет оторвавшуюся ртуть к остальной или руку с термометром резко ударяют о стол. В случае надобности можно нагреванием перевести в расширение столбик ртути значительной длины, встряхиванием термометра отрывают этот столбик от остальной ртути, чтобы соединить его с находящейся в расширении остальной ртутью, затем посредством кругового вращения вся ртуть прогоняется в шарик. Во многих случаях целесообразно осторожно подогревать верхнее расширение термометра так, чтобы погнать ртуть в трубку. Если впоследствии ртуть несколько раз все же отрывается на том же месте, то термометр следует охлаждать льдом или ватой, намоченной эфиром настолько, чтобы ртуть всего столба сбежала в шарик, где она вся соединяется.

Термометры изготовляются со шкалами для различных пределов измерения. Часто термометры имеют деления от —10 до +100° С или еще выше, с другой стороны изготовляют примыкающие друг к другу по пределам измерения наборы термометров, как, например, от 0 до 40°, 35 до 70°, 70 до 110° С. Чем уже предел измерения, тем шире шкала и, следовательно, тем точнее показания, конечно, в опытных руках, но тем меньше область применения прибора. Если желательно пользоваться термометром для более высоких температур, чем он предназначен, то встряхиванием термометра можно отвести немного ртути в верхнее расширение и в таком виде пользоваться термометром, но при этом необходимо определить путем сравнения с другим термометром, сколько градусов необходимо присчитать к каждому отсчету по термометру. Обыкновенный термометр при соответствующей шкале применяется для температур примерно до 200°. Выше 200° начинается заметное испарение ртути и во избежание этого безвоздушное пространство над ртутью наполняется азотом или углекислотой при давлении около 10 *ат*. Термометр из иенского стекла $2954^{III}$, отличаемого по черно-коричневой продольной полоске, применяется до 500° С из стекла Супремакс (без обозначения) даже до 600° С (при этой температуре одновременно размягчается и стекло). Последнее должно быть достаточно толстостенным. Название *азотный термометр* отнюдь не характерно, так как действующим в нем элементом все же является ртуть. Термометры из кварцевого стекла, т. е. из плавленного кварца с ртутным наполнением применяются даже до 750° С; их преимущество заключается в нечувствительности к резким колебаниям температуры. Все же их применение сопряжено с опасностью взрыва, так как внутреннее давление, т. е. давление паров ртути доходит до 100 *ат*. По своей конструкции ртутные термометры являются либо термометрами со вставной шкалой из бумаги или молочного стекла, установленной около капилляров и вся эта конструкция помещается в наружную стеклянную трубку, либо палочным термометром с наружной шкалой, вытравленной на толстостенном капилляре. В таких термометрах шкала при высоких температурах или от действия кислот и щелочей часто делается нечеткой, поэтому следует приветствовать почин фирмы Зиберт и Кюн, изготовляющей закрытые термометры до 750° С; шкала для этих термометров изготовляется из тугоплавкого стекла, вместо легкоплавкого молочного. Показания термометров, работающих на принципе расширения, зависят от степени их погружения в испытываемую среду. Независимо

---

[1] В СССР иенское стекло $16^{III}$ изготовляется заводом «Дружная горка». Оно отличается плавленной белой полоской. (*Прим. ред.*).

от общих точек зрения по вопросу об установке термометра, о чем будет сказано в § 124, здесь следует отметить, что речь идет о *несоответствии между температурой ртутного столбика* термометра и температурой его шарика. Обычно термометр градуируется при погруженном полностью ртутном столбике. Исключение составляют термометры для измерения высоких температур порядка выше 200° С, каковые иногда градуируются с выступающим из среды ртутным столбиком, что обозначается на термометре. Целесообразно было бы указать на термометре численно длину погружательного его конца при градуировке. По отношению к высоким температурам незначительные колебания температуры окружающего воздуха не имеют значения. Но в таких случаях весь ртутный столбик должен выступать из среды, что зачастую представляет неудобства.

Термометры, градуированные с погруженным ртутным столбиком, должны быть использованы по возможности в таких же условиях; таким образом их можно установить в колене трубопровода вместо простого тройника. Если нельзя обойтись без термометра с выступающим из измеряемой среды ртутным столбиком, то, помимо внесения в его показания поправки соответственно градуировке прибора, необходимо внести еще поправки на выступающий из среды ртутный столбик. Если $\alpha$ коэфициент расширения ртути, то его столбик длиной в 1 *см* при нагреве на 1° удлиняется на $\alpha$ *см*. Так как деления шкалы сами тоже удлиняются, то под обозначением $\alpha$ понимается коэфициент кажущегося расширения ртути в стеклянной трубке; в иенском стекле $16^{III}\alpha = 1 : 6300$. Если по нормальному термометру произведен отсчет в $t_0$, в то время, как выступающий на $n$ градусов ртутный столбик имеет температуру $t_f$, то действительная температура шарика термометра будет равна $t = t_0 + \frac{n \cdot (t - t_f)}{6300}$ или в виду незначительной разницы между $t$ и $t_0$ искомое $t$ будет равно:

$$t = t_0 + \frac{n\,(t_0 - t_f)}{6300}. \qquad (1)$$

Второе слагаемое этой формулы является поправкой на выступающий ртутный столбик. Температура ртутного столбика определяется вспомогательным термометром, шарик которого находится на половине высоты ртутного столбика.

Пример. Пусть произведено измерение температуры отходящих газов и получен отсчет в 324°, причем ртутный столбик выступал, начиная с 150° С, а температура его была измерена и оказалась равной 32°. Поправка на выступающий ртутный столбик составляет $\frac{(324-150)\cdot(324-32)}{6300} = 8{,}06 \backsim 8°$; следовательно, действительная температура будет равна 332° С, а не 324° С. Если желательно определить соответствующие этому тепловые потери, происходящие от того, что дымовые газы уходят с температурой высшей 20°, то получим погрешность в $\frac{8}{332-20} \cdot 100 = 2{,}6\%$, если не принимать во внимание поправку на выступающий столбик. При измерении даже незначительных температур эта погрешность не является малой. Пусть в поверхностном конденсаторе или водоподогревателе произведен отсчет температуры притекающей воды в 10,6° и температуры отходящей воды в 39,7°, т.е. определено повышение температуры в 29,1°. Температура окружающей среды равна 27°; пусть она является также температурой ртутных столбиков обоих термометров, причем термометр погружен в измеряемую среду до точки —10°. Тогда поправки на выступающие ртутные столбики равны: для температуры притекающей воды —0,053° (отрицательная) и для температуры отходящей воды +0,099°. Если учесть эти поправки, то повышение температуры воды составит 0,053 + 0,099 или 0,15°; следовательно, при игнорировании этих поправок, погрешность показаний термометра равна $\frac{0{,}15}{29{,}1} \cdot 100 \backsim 0{,}5\%$. Если производство таких поправок затруднительно, то не следует указывать результата, по крайней мере, с большим числом цифровых знаков.

По особым соображениям некоторые термометры расширения наполняются другими жидкостями вместо ртути. В полях переменного электрического тока

ртутные термометры дают неправильные показания, вследствие появления вихревых токов. Имея в виду, что ртуть при —39° замерзает, необходимо при измерениях температур несколько ниже —30° применять термометрические жидкости с более низкой температурой замерзания. Алкоголь для термометров не подходит, так как в таких термометрах нельзя определять основную температурную точку в 100° С, а также и потому, что наличие в нем незначительной загрязненности (влажности) вызывает значительные изменения в расширении и смачивании. Напротив, толуол кипит при температуре + 110° и может быть использован для низких температур до —70°, вместе с тем его легко получить в чистом виде. Для самых низких температур, примерно —200° С применяется пентан Кальбаум, изготовленный специально для термометров. Термометры со смачивающей жидкостью следует охлаждать лишь постепенно, так как в противном случае к стенкам капилляра термометра прилипают заметные количества наполняющей жидкости, в результате чего термометр будет показывать более низкую температуру. Столбик жидкости должен опускаться настолько медленно, чтобы смачивание преодолевалось сцеплением частей жидкости и чтобы смачивающее количество жидкости быстро опускалось к основному ее количеству. При слишком быстром охлаждении мениск жидкости становится сильно вогнутым, между тем как он должен быть почти плоским. Для таких термометров поправка на жидкостный столбик вследствие более сильного расширения толуола и пентана будет равна $\frac{n \cdot (t_0 - t_f)}{800}$, т. е. значительно больше, чем для ртутных термометров.

**§ 120. Электрические термометры сопротивления,** применяемые для измерения температур, основаны на изменении электрического сопротивления металлов с изменением их температуры. Для большинства чистых металлов это увеличение сопротивления при нагреве +100° почти одинаково и составляет около 40%[1]. Если в мосте Уитстона сопротивление четырех плеч подобрано так, что при какой-то температуре одного из них ток не проходит через гальванометр, то ток в нем появится немедленно, как только одно из плеч моста будет нагрето до другой температуры, подлежащей измерению. Отсчет температуры может быть произведен посредством изменения сопротивления одного из трех остальных плеч моста до тех пор, пока в мосте опять не будет тока. Известно, что тогда для сопротивлений $a$, $b$, $c$ и $d$ четырех плеч моста основным является отношение

$$a : b = c : d, \qquad (2)$$

где $a$ и $b$ постоянные сопротивления, т. е. необходимо, чтобы они не подвергались влиянию неизбежных температурных колебаний, вследствие чего их изготовляют из манганина; $c$ изменяют до тех пор, пока ток в мосте не исчезнет, и отсюда определяют $d$; указатель величины $c$ снабжен непосредственно делениями, указывающими температуру; $c$ должно изменяться небольшими ступенями. Отсутствие тока устанавливается гальванометром или телефоном. Такие равновесные методы всегда неудобны (§ 11); изменения подлежащей измерению величины не замечаются сразу и нельзя следить за ее изменениями. Однако, этот метод можно без сомнения дополнить установкой сервомотора, описанной на стр. 44 (рис. 22 для термопары). Проще можно достигнуть цели, если сделать отсчет прямым, оставляя неизменными сопротивления $a$, $b$ и $c$ и судить по отклонению гальванометра о величине сопротивления $d$, изменение которого вызывает появление тока в мосте.

Гальванометр снабжается шкалой, отградуированной в градусах. В таких случаях напряжение $E$, подводимое к мосту, должно быть постоянным. Установка необходимого напряжения производится по схеме, показанной на рис. 343. Посредством переключателя в четвертое плечо моста Уитстона вводится вспомогательное сопротивления $D_1$, а регулирующий реостат необходимо установить так, чтобы гальванометр давал отклонение, отмеченное специальной чертой. Затем, посредством переключателя на место $D_1$ вводится термометр со спи-

[1] Для ферромагнитной группы металлов это увеличение больше, для чистого железа—65% и для никеля — 67%.

ралью $D_2$, после чего регулирующий реостат уже нельзя больше перестанавливать. При далеком расположении термометра от моста, сопротивление медных проводов установки изменяется от колебания температуры. Последнее обстоятельство, однако, не влияет на остальные три плеча моста. Этого влияния, аналогичного влиянию температуры на выступающий столбик ртутного термометра, можно избежать, применив схему включения, показанную на рис. 344, для которой, однако, требуется три провода. Сделать установку термометра независимой от напряжения источника тока можно применением гальванометра со скрещенными рамками (логометра), непосредственно указывающего (§ 15) отношение сопротивлений обоих ответвлений тока $W$ и $T$ (рис. 345). Чтобы приспособить такой прибор к переменным пределам измерения, можно включать

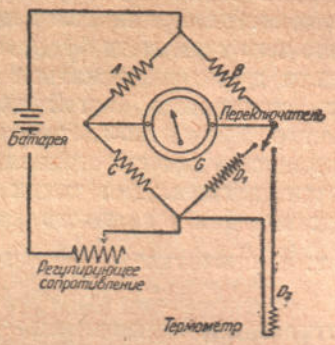



Рис. 343. Схема регулирования напряжения.

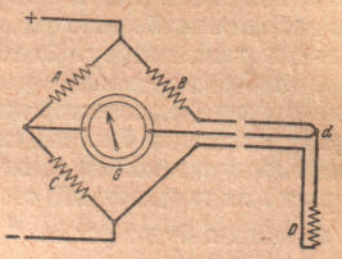


Рис. 344. Схема, устраняющая влияние от температурных изменений на проводку на далекое расстояние.

Рис. 343—344. Схемы моста для измерения температур.

реостат вместо ответвления $W$, при надобности сопротивления его меняют, вынимая нужный штепсель; дальнейшее увеличение предела измерения можно осуществить включением в цепь тока термометра второго реостата. В таком виде получается универсальный, применяемый для лабораторных измерений прибор, который вместе с тем является и независимым от температуры окружающей среды. Сопротивления электрических термометров обычно состоят из платины и подобраны так, что при 0° имеют определенное сопротивление; так, например, термометры сопротивления фирмы «Гартман и Браун» имеют сопротивление 90 *ом*, термометры Гереуса имеют обычно сопротивление в 50 или 100 *ом*; термометры завода Пирометр — 46 *ом* (подробно см. таблицу 21). Измеряющую платиновую проволоку можно компактно поместить в небольшом объеме, но можно также распределить ее и на большое протяжение.

Таблица 21

**Изменение сопротивления электрических термометров сопротивления**

$R_t = R_0\,(1+\alpha t+\beta t^2)$; у Гереуса $\alpha = +3{,}927\cdot 10^{-3}$, $\beta = -6{,}18\cdot 10^{-7}$,

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t=$ | —50 | —40 | — 30 | —20 | —10 | 0° | +10 | +20° C |
| Гартман и Браун = | 72,2 | 75,8 | 79,35 | 82,9 | 86,45 | 90,00 | 93,5 | 97,05 *ом* |
| Гереус = | 40,11 | 42,10 | 44,08 | 46,06 | 48,03 | 50,00 | 51,96 | 53,91 *ом* |
| $t=$ | +30 | 40 | 50 | 50 | 70 | 80 | 90 | 100° C |
| Гартман и Браун = | 100,55 | 104,05 | 107,55 | 111,0 | 114,45 | 117,9 | 121,35 | 124,8 *ом* |
| Гереус = | 55,86 | 57,80 | 59,74 | 61,67 | 63,59 | 65,51 | 67,42 | 69,33 *ом* |

В конструкции термометра сопротивления, показанной на рис. 346, вся платиновая проволока намотана в виде спирали на кварцевую трубочку и покрыта кварцевой пробиркой, туго надеваемой на намотку. Такой конструкцией в целом пользуются как стеклянным ртутным термометром. На конструкции, показанной на рис. 347, платиновая проволока намотана на слюдяные

полоски и эта намотка, покрытая такими же полосками, помещена в стальную трубку с фарфоровой головкой для защиты от грубого обращения с термометром. По сравнению с сопротивлением рабочей обмотки термометра, сопротивление питательных проводов должно быть очень незначительным[1]. В противном случае при падении температуры, в работе могут создаться такие условия, которые сделают необходимым введение поправки к показаниям, аналогично поправке на выступающий ртутный столбик, и отсутствие которой как раз и является главным преимуществом термометра сопротивления перед жидкостными термометрами. Поэтому необходимо или увеличить сечение подводящей платиновой проволоки или из экономических соображений перейти на другу проволоку, например, на серебрянную; в последнем случае оба места перехода должны иметь измеряемую температуру или по крайней мере одинаковую между собой температуру, во избежание возникновения термоэлектрических сил. Точно так же необходимо следить за тем, чтобы устранить во внешней цепи возможность появления паразитных термоэлектрических сил в местах, где разные металлы соприкасаются между собой, как например, латунные клеммы и медная

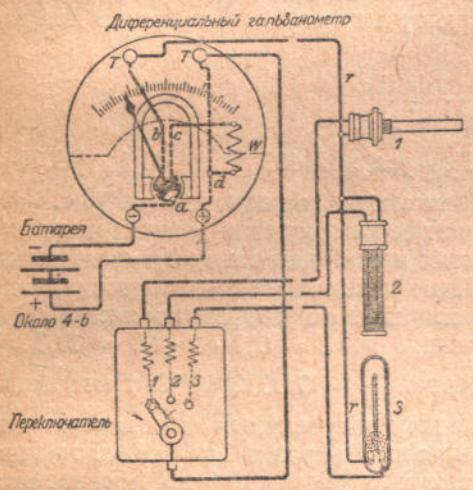



Рис. 345. Схема установки электрического термометра сопротивления с логометром постоянного тока, фирмы «Гартман-Браун».

Рис. 346. Термометр сопротивления, фирмы «Гереус».

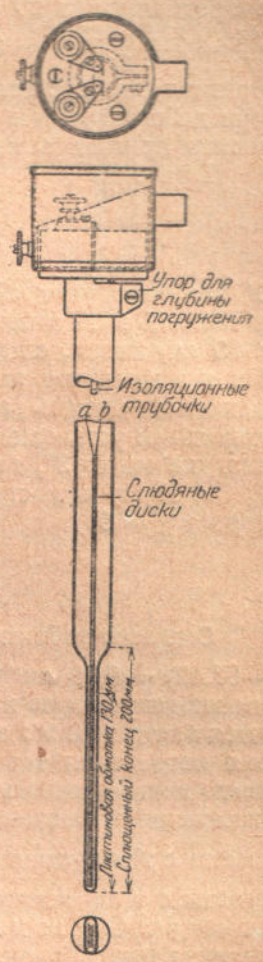



Рис. 347. Термометр сопротивления с длинным хвостом, фирмы «Гартман и Браун».

проволока. Такие места перехода должны быть расположены так, чтобы паразитные термотоки взаимно уничтожались, для чего проще всего места соединения следует расположить рядом. На рис. 345 изображены три типа термометров для различного применения; добавочные сопротивления, которые установлены вместе с переключателем в отдельных ветвях тока, дают возможность уравнять сопротивление соединительных проводников разной длины или получить на гальванометре различные области измерения термометров сопротивления. Представление о чувствительности, достигаемой мостом при измерении температур, дают выведенные формулы:

---

[1] Если измерение производится термометром с потенциальными проводами, то влияние соединительных проводов исключается. (*Прим. ред.*).

1. В мост помещен милливольтметр с высоким сопротивлением; сопротивление прибора $g = \infty$;

$$\frac{de}{dt} = E \cdot \frac{1}{4a} \cdot \frac{dx}{dt}.$$

Согласно таблицы 21 термометр сопротивления Гартман и Браун при 0° имеет сопротивление в 90 *ом* и изменение его сопротивления около 0° будет равно $\frac{dx}{dt} = \frac{93,5 - 86,45}{20} = 0,353$ *ом*/°С. Допускаемая нагрузка для термометра сопротивления составляет 0,05 *a*, для моста, следовательно, нагрузка = 0,1 *a*, при действительном сопротивлении всего мостового четырехугольника в 90 *ом* можно применить напряжение $E = 0,1 \cdot 90 = 9V$.

При этом

$$\frac{de}{dt} = \frac{9}{4 \cdot 90} \cdot 0,353 = 0,00882 \ \frac{V}{°C}.$$

У наиболее употребительного милливольтметра, сопротивлением в 1000 *ом* и шкалой в 17 милливольт (считая 1000 *ом* большой величиной по сравнению с 90 *ом*) имеем, следовательно, область измерения округлено в 17 : 8,82 = 2°. Имея в виду, что этим прибором можно надежно измерять еще 0,1 *mV*, то им можно определить разность температур в 0,0001 : 0,00882 = 0,0114°. Если в холодильной установке речь идет о снижении температуры соляного раствора или воздуха около 3°, то неточность измерения составляет лишь, примерно, 0,4%.

2. Пусть в мосте помещен миллиамперметр малого сопротивления для которого $g = 0$;

$$\frac{di}{dt} = E \cdot \frac{1}{4a^2} \cdot \frac{dx}{dt}.$$

Согласно таблицы 21 для термометра Гереуса при 100° $\frac{dx}{dt} \sim 0,1 \cdot (69,33 - 67,42) = 0,19$ *ом*/°С и $a = 69,33$ *ома*. Термометры, показанные на рис. 346, имеют допустимую нагрузку в 0,01 *a* и при этом на открытом воздухе нагреваются почти на 0,5°; эту нагрузку в жидкостях можно довести до 0,1 *a*, не вызывая нагревания термометра выше 0,1°. При действительном сопротивлении всего мостового четырехугольника округленно в 69 *ом* рабочее напряжение при измерении в жидкости должно быть повышено до $E = 0,1 \cdot 2 \cdot 69 = 13,8$ *V*; вместе с тем чуствительность становится равной $\frac{di}{dt} = 0,00120$ *a*/°С. Если пользоваться при измерении общеизвестным комбинированным милливольт-амперметром Сименс и Гальске, где одно деление шкалы равно 1 *мв* = 1 *ма*, то одно деление шкалы равняется 0,83°. Вообще таким прибором можно производить измерение с точностью до $^1/_{10}$ деления шкалы. Следовательно, определение температур можно произвести с точностью до $^1/_6$°. Такая точность вполне удовлетворительна при измерении температур около 100°, но недостаточна при измерении температур в холодильных машинах. Для последних, однако, предел измерения излишне велик, так как 150 делений шкалы соответствуют 125°.

3. В мосте помещен прибор со средним сопротивлением, которое почти равняется сопротивлению плеча моста, тогда $g = a$. В этом случае чувствительность равна

$$\frac{de}{dt} = E \cdot \frac{1}{8a} \cdot \frac{dx}{dt}.$$

Эта чувствительность в два раза меньше чем в первом, указанном выше, случае, где характеристическое отношение было бы $\frac{de}{dt} = 0,00441$ *V*/°С.

Для измерения с достаточной точностью очень незначительных разностей температур применяются милливольтметры Сименс и Гальске с ленточным подвесом, которые находят применение и в технической практике. Та-

кой милливольтметр самой точной конструкции имеет сопротивление в 61 *ом*, т. е. того же порядка как и сопротивление термометра. Шкала по обе стороны нуля имеет по 30 делений и можно рассчитывать на то, что измерение до $^1/_5$ деления шкалы можно производить с достаточной надежностью. Так как одно деление означает 0,05 *мв*, то имеется возможность измерять разности величиной в 0,01 *мв*, а так как 4,37 *мв* = 1°, то измерение можно производить с точностью до 1 : 437 = 0,0023°. Такова в общих чертах достижимая в отдельных случаях точность отсчета. При отказе от достижения такой точности прибор снабжается переключаемыми добавочными сопротивлениями, отчего предел измерения прибора расширяется. Меньшая точность измерения получается при пользовании гальванометром со скрещенными рамками (логометром), изображенного рис. 345. Но зато логометр имеет ряд преимуществ; хотя логометр менее чувствителен, чем гальванометр с подвижной рамкой, но через него проходит полный ток, а не часть его, как это имеет место при мостовой схеме. Вместе с тем, гальванометр со скрещенными рамками и без добавочного сопротивления из манганина свободен от влияния температуры окружающей среды, вследствие чего его чувствительность полностью может быть использована. В каждом из вышеприведенных трех случаев чувствительность может быть повышена вдвое применением двух термометров одинакового сопротивления, установленных в зоне измеряемой температуры и введенных в противолежащие плечи мостового четырехугольника, т. е. *A* и *D* на рис. 343. В том случае, когда требуется производить измерение не температуры, а *разностей температур*, необходимо всегда непосредственно измерять эту разность, для чего пользуются двумя одинаковыми термометрами сопротивления, включая их в смежные плечи мостового четырехугольника, т. е. в *C* и *D*. Двойная чувствительность получается при установке четырех термометров сопротивления в четыре плеча мостовой схемы, так что термометры, включенные в плечи *A* и *D*, находятся при одной температуре, включенные в плечи *B* и *C* — при другой (перекрестное включение). Такие установки применяются, главным образом, в холодильных установках, где температурный режим остается без измерения. При колебаниях же температуры, показание диференциальной схемы зависит от температуры термометра, что особенно обременительно при водяном отоплении (рис. 369) и при психрометрах (рис. 377). Эта зависимость частично происходит от члена $\beta$ квадратичного уравнения таблицы 21, главным же образом от формул (5) до (8). Известное влияние на характер шкалы можно оказать путем подбора схемы моста с омметром со скрещенными рамками, как у психрометров, которые должны прямо указать относительную влажность (Л.). При пользовании омметром со скрещенными рамками, сравниваемые термометры вводят в цепь обеих катушек, выключив сопротивление *W* (рис. 345). Указываемое тогда отношение сопротивлений зависит еще от разности температур; согласно таблицы 21 это отношение сопротивлений при $\Delta t$ от 10 до 30° С относится как 100 : 107,55 от 70 до 90° С — как 100 : 106,03. Разность, отнесенная к повышению температур, равна 21%. При измерении разности температур сопротивления термометров должны быть хорошо подогнаны к стандартной величине.

При измерении разности температур можно достичь дальнейшего увеличения чувствительности путем повышения рабочего напряжения *E*. Однако, при повышении силы тока, протекающего по проволочной спирали термометра, будет нагреваться и сама спираль пропорционально квадрату силы тока, отчего измеряемая температура будет выше действительной. При измерении разностей температур эта погрешность почти отпадает, поскольку оба термометра одинаково армированы и потому, что при одинаковой силе тока в них выделяется почти одинаковое количество тепла и они испытывают одинаковое повышение температуры. При переходе тока с одного металла на другой возникает *эффект* Пельтье, благодаря которому место перехода в зависимости от направления тока нагревается или охлаждается. Влияние эффекта Пельтье не уничтожается даже при симметричном расположении двух мест перехода тока, но наоборот усиливается. Однако, это влияние является все же незначительным. При пользовании толстыми проводниками, хорошо излучающими тепло, эффект Пельтье дает меньшие паразитные термотоки, чем при тонких проволоках (Л.).

Нагревание рабочего сопротивления является важнейшим источником погрешности электрических термометров сопротивления, препятствующим повышению их чувствительности посредством применения более высокого рабочего напряжения. Ток, протекающий по проволоке рабочего сопротивления, повышает температуру термометра, с одной стороны в зависимости от силы тока, с другой— от теплопроводности всей установки. Следует избегать тепловой изоляции термометров от измерительной среды при их установке, имея в виду, что в таких случаях показания прибора сильно запаздывают. Данные таблицы 22 могут служить непосредственно для численных определений температур лишь тогда, когда сила тока настолько мала, что сколько-нибудь заметное повышение температуры по отношению к точности измерения не может иметь место; это бывает в том случае, когда повышение рабочего напряжения ровно вдвое соответствует двойному отклонению гальванометра моста; посредством такого наблюдения можно также численно определить влияние повышения температуры. Влияние нагрева можно однако устранить, работая всегда с *определенным рабочим напряжением* и производя при нем же проверку термометра или же каждое измерение температуры небходимо сводить к измерению *разности температур*, что всегда применяется при измерении низких температур. При измерении же высоких температур предъявляются меньшие требования в отношении точности измерения.

Можно еще уменьшить влияние нагрева, увеличивая длину и сечение проволоки термометра (при одинаковом сопротивлении); это в отношении платины, конечно, резко повышает стоимость термометра, поэтому иногда применяют никелевую проволоку, которая имеет несколько более высокий температурный коэфициент, чем платина.[1] Для питания термометра сопротивления иногда применяется также и переменный ток. В таких случаях указывающим прибором к термометру служит прибор с кольцом из мягкого железа (рис. 29). Термометры сопротивления обычно применяются при измерении температур до 600°.

**§ 121. Измерение температур термоэлектрическим методом.** Этот метод применяется преимущественно при измерении высоких температур, но им охотно пользуются и при измерении низких температур. Термоэлектрические пирометры по сравнению с ртутным термометром обладают тем серьезным преимуществом, что отсчет их показаний может быть произведен в любом месте, вдали от места установки термопары, причем одним и тем же указывающим прибором можно производить отсчет показаний ряда термопар. Поскольку термоэлектрические и другие аналогичные приборы служат для измерения преимущественно высоких тепмератур, все они называются *пирометрами*.

Термоэлектрический пирометр состоит из термопары, соединительных проводов и прибора для измерения электродвижущей силы. Термопары по своей конструкции подразделяются на проволочные и трубчатые. В проволочной термопаре место соединения двух проволок из разных металлов, помещаемое в среду измеряемой температуры, называется рабочим концом (горячим спаем). Другое же место соединения термопары, замыкающее цепь тока, называемое свободным концом (холодным спаем), а также и все другие соединения, если применяется и третий металл, должны находиться при постоянной, не меняющейся температуре. Трубчатая термопара состоит из металлической защитной трубки, являющейся одновременно одним из термоэлектродов, в дно которой заваривается второй термоэлектрод. Преимущества последней конструкции заключаются в следующем:

1. Благодаря открытому рабочему концу (горячему спаю) показания термопары получаются значительно быстрее, чем у проволочной термопары.
2. Удешевляется стоимость термопары.
3. Отпадает надобность в отдельной защитной трубке.

При нагреве рабочего конца термопары, в последней возникает термоэлектродвижущая сила $E$, зависящая при определенной паре металлов от разности

---

[1] Никель может применяться до 200° С, в то время как платина до 1000° (проволока ∅ 0,6*мм*).

температур рабочего и свободного конца (горячего и холодного спая). Как видно из схемы установки термоэлектрического пирометра, показанной на рис. 348, термопара помещена в защитную трубку и соединена с милливольтметром, по которому и производится отсчет температур. Термоэлектроды, применяемые для изготовления термопар, должны удовлетворять следующим техническим условиям:

1. Обладать большой гомогенностью.
2. Иметь высокую точку плавления.
3. По возможности не подвергаться окислению, испарению и изменению в окислительной или восстановительной среде.
4. Иметь возможно высокую термоэлектродвижущую силу, отличающуюся постоянством при длительной работе.
5. Обладать хорошей обрабатываемостью.
6. Иметь низкую стоимость.

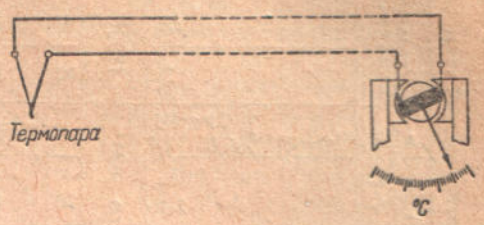


Рис. 348. Схема термоэлектрического пирометра с показывающим гальванометром.

В виду столь серьезных требований, предъявляемых к качеству термоэлектродов, для изготовления последних применяется лишь незначительное количество металлов и сплавов. Ниже приводим таблицу термоэлектродвижущих сил, развиваемых различными проводниками в паре с платиной при температуре рабочего конца 100° С и свободного конца 0° С.

| Наименование проводника | Т. э. д. с. | Точка плавления в °С | Наименование проводника | Т. э. д. с. | Точка плавления в °С |
|---|---|---|---|---|---|
| Теллур . . . . . | +50 | 452 | Свинец . . . . . | + 0,44 | 327 |
| Кремний . . . . | 44,8 | 1,414 | Олово . . . . . | 0,42 | 232 |
| Сурьма . . . . . | 4,7 | 630,5 | Магний . . . . . | 0,42 | 321 |
| Нихромы [1] . . . . | 1,6÷2,4 | — | Алюминий . . . . | 0,40 | 660 |
| Железо . . . . . | 1,8 | 1 350—1 450 | Уголь . . . . . | 0,30 | 3 490 [4] |
| Сплав 90% Pt и | | | Графит . . . . . | 0,22 | 3 490 |
| 10% Ir . . . . | 1,3 | — | Ртуть . . . . . | 0.0 | — 39 |
| Молибден . . . . | 1,2 | 2 600 | Платина . . . . | 0,00 | 1 771 |
| Кадмий . . . . . | 0,9 | 321 | Паладий . . . . . | — 0,57 | 1 557 |
| Вольфрам . . . . | 0,8 | 3 380 | Никель . . . . . | — 1,49 | 1 452 |
| Сталь V2A [2] . . . | 0,77 | 1 400 | Алюмель [5] . . . . | — 1,7 | — |
| Медь . . . . . | 0,76 | 1 083 | Кобальт . . . . . | — 1,8 | 1 490 |
| Манганин [3] . . . | 0,76 | — | Сплав 60% Au | | |
| Залото . . . . . | 0,75 | 1 063 | 30% Pd и 10% Pt | — 2,3 | — |
| Серебро . . . . . | 0,72 | 960,5 | ДиП 1 и ДиП 2 [6] . | — 2,4 | — |
| Цинк . . . . . | 0,75 | 419,5 | Константан [7] . . . | — 3,4 | — |
| Иридий . . . . . | 0,65 | 2 350 | Висмут ⊥ к оси . | — 5,2 | 271 |
| Родий . . . . . | 0,64 | 1 970 | Висмут ∥ оси . . | — 7,7 | 271 |
| Сплав 90% Pt и | | | Пирит . . . . . | —12,1 | — |
| 10% Rh . . . . | 0,64 | — | Молибденит . . . | —69,0 ÷ —104,0 | — |
| Тантал . . . . . | 0,45 | 2 850 | | | |

На таблице 22 дано изменение термоэлектродвижущей силы $E$ (при холодном спае в 0° С и горячем спае в $t$°), а также величина поправочного коэфициента $k$ при разных температурах $t$ горячего спая для ряда наиболее употребительных термопар.

---

[1] Сплав никеля с хромом в некоторых случаях с добавкой железа состава: Cr:10 . . . 30%, FeO . . . 25, остальное никель.
[2] Нержавеющая сталь фирмы «Крупп» состава C : 0,1 . . . 0,15%, Cr : 1%; Ni : 9 . . . 10%
[3] Сплав для изготовления электрических сопротивлений: Cu≈82%, Mn≈15%; Ni≈30%.
[4] Температура возгонки.
[5] Сплав Ni : 94%, Al : 2%, Mn : 2,5%, Fe : 0,5%.
[6] ДиП I : Fe 75%, Ni 25%.
ДиП II : Cu 75%, Ni 25%.
[7] Медно-никелевый сплав: Cu : 60%, Ni : 40%.

Таблица 22

**Термоэлектродвижущие силы и поправочные коэфициенты на температуру холодных спаев наиболее употребительных термопар**

| Наименование | Константан-медь | | Константан-серебро | | Константан-железо | | Константан-нихром | | ДиП | | Хромель-алюмель | | Паллаплат | | Платина-платинородий | | Иридий-родий-иридий | | Вольфрам-молибден-железо | | Платина-платина-родий-рений | | Уголь-вольфрам | | Уголь-карбид силиция | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Состав | Cu—54%, Ni—46% | Cu | Cu—54%, Ni—46% | Ag | Cu—54%, Ni—46% | Fe | Cu—54%, Ni—46% | Ni—85,3% Cr—12,5% Fe—2,5% | Ni—75%, Fe—25% | Ni—75%, Cu—25% | Ni—89%, Cr—9,8% Fe—1,0%, Mn—0,2% | Ni—94%, Al—2% Si—1%, Mn—2,5% Fe—0,5% | Pt—90%, Rh—10% | Au—60%, Pd—30% Pt—10% | Pt | Pt—90%, Rh—10% | Ir | Rh—60%, Ir—40% | W | Mo—9%, Fe—1% | Pt | Pt—90,5%, Rh—5% Re—4,5% | C | W | C | SiC |
| Пределы измерения температур в °С | —250 до 600° | | —20 до 650° | | —250 до 700° | | до 800° | | от 400 до 900° | | до 1100° | | 20 до 1250° | | от 350—1600° | | до 2000° | | до 1800° | | до 1600° | | 1800° | | 2000° | |
| | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к | E | к |
| 0 | 0 | 1,00 | 0 | 1,00 | 0 | 1,00 | 0 | 1,00 | 0 | 0 | 0 | 1,00 | 0 | 1,00 | 0 | 1,00 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 20 | 0,76 | 1,00 | 0,77 | 1,00 | 1,02 | 1,00 | — | — | 0 | 0 | 0,82 | 1,00 | — | — | 0,11 | 1,00 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 100 | 4,07 | 0,93 | 4,09 | 0,97 | 5.20 | 1,00 | 5,6 | 0,91 | 0 | 0 | 4,1 | 1,00 | 2,95 | 1,00 | 0,64 | 0,86 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 200 | 8,79 | 0,83 | 8,85 | 0,86 | 10,68 | 0.99 | 12,1 | 0,80 | 0 | 0 | 8,2 | 0,98 | 6,60 | 0,81 | 1,43 | 0,70 | 1,10 | 5,5 | —0,6 | — | — | — | — | — | — | — |
| 300 | 14,03 | 0,73 | 14,16 | 0,77 | 16,09 | 0,99 | 19,1 | 0,75 | 0,47 | 0 | 12,4 | 1,00 | 11,10 | 0,66 | 2,31 | 0,63 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 400 | 19,63 | 0,64 | 19,92 | 0,68 | 21.55 | 0,98 | 26,5 | 0,70 | 2,25 | 0 | 16,6 | 1,00 | 15,60 | 0,66 | 3,24 | 0,60 | 2,20 | 5,5 | +0,0 | — | 8 | — | 3,8 | — | — | — |
| 500 | 25,54 | 0,60 | 26,04 | 0,65 | 27,14 | 1,02 | 34,2 | 0,70 | 5,20 | 0 | 20,7 | 0,96 | 20,10 | 0,66 | 4,22 | 0,56 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 600 | — | — | 32 50 | 0,62 | 32,75 | 1,00 | 42,0 | 0,70 | 9,45 | 0 | 25,0 | 0,98 | 25,40 | 0,56 | 5,22 | 0,65 | 3,30 | 5,5 | 0,8 | — | 12 | — | 8 | — | — | — |
| 700 | — | — | — | — | 37,70 | 0,91 | 50,1 | 0,67 | 14,32 | 0 | 29,1 | 1,00 | 30,70 | 0,56 | 6,26 | 0,53 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 800 | — | — | — | — | — | — | 58,0 | 0,67 | 19,40 | 0 | 33,2 | 1,00 | 36,05 | 0,55 | 7,33 | 0,51 | 4,40 | 5,5 | 2,6 | — | 18 | — | 14 | — | — | — |
| 900 | — | — | — | — | — | — | — | — | 24,80 | 0 | 37,3 | 1,00 | 41,30 | 0,56 | 8,43 | 0,50 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | 30,50 | 0 | 41,3 | 1,02 | 46,60 | 0,56 | 9,57 | 0,48 | 5,50 | 5,5 | 4,4 | — | 24 | — | 20 | — | — | — |
| 1 100 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 45,0 | 1,02 | 51,95 | 0,55 | 10,74 | 0,47 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 200 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 57,30 | 0,55 | 11,93 | 0,46 | 6,6 | 5,5 | 6,4 | — | 30 при 1250° | — | 24 | — | 350 | — |
| 1 300 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 13,13 | 0,46 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 400 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 14,33 | 0,46 | 7,65 | 5,25 | 8,08 | — | — | — | 29 | — | 413 | — |
| 1 500 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 15,55 | 0,45 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 600 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 16,75 | 0,46 | 8,70 | 5,25 | 11,2 | — | 36 | — | 33 | — | 480 | — |
| 1 800 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 2 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 9,80 | 5,5 | 13,8 | — | 42 | — | 37 | — | 508 при 1750° | — |
| 2 200 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 10,85 | 5,25 | 16<br>18,6 | —<br>— | —<br>— | —<br>— | 40<br>44 | —<br>— | —<br>— | —<br>— |

Из наиболее употребительных термопар для нужд промышленных и лабораторных измерений температур считаем необходимым остановиться на нижеследующих.

*Медь-константановые проволочные термопары* применяются, главным образом, для теплотехнических целей при измерениях температур до 400° С в отходящих газах и перегретом паре. Трубчатые термопары (никелированная трубка из красной меди с заваренной в дно последней константановой проволокой) применяются для измерений до 600°.

*Серебро-константановые термопары* применяются для измерения температур до 600° преимущественно для лабораторно-исследовательских работ.

*Железо-константановая термопара* в зависимости от гомогенности термоэлектродов применяется иногда до 900°. В пределе 750° возможны погрешности в показаниях. Обычно эта термопара употребляется при измерениях температур до 700—800° С. При температурах свыше 600° заметно окисление железного термоэлектрода. Наличие окислительной или восстановительной среды оказывает на точность показаний термоэлемента довольно слабое влияние. Эта термопара является весьма устойчивой к восстановительным и агрессивным газам и здесь срок ее службы еще более длителен, чем, например, термопары платина-платина-родий и никель-нихром. Для постоянных измерений эту термопару рекомендуется устанавливать в сухом пространстве. Железо-константановая термопара является одной из лучших промышленных термопар.

*Никель-нихромовая термопара* применяется для измерения температур до 1000°. При температуре выше 800° С никель рекристаллизуется и становится хрупким и ломким.

*Хромель-алюмелевая термопара,* имеющая громадное применение почти во всех отраслях промышленности, служит для измерения температур до 1100°С. Эта термопара отличается высокой термоэлектродвижущей силой и жароупорностью, большой устойчивостью к воздействиям окислительной атмосферы и неизменностью показаний. Для кратковременных измерений она применяется даже до 1300°. Эта термопара является наиболее устойчивой и точной из всех термопар из неблагородных металлов и наиболее надежна в работе и в настоящее время совершенно вытеснила термопару никель-нихром.

*Термопара ДиП* из никель-железных и никель-медных сплавов применяется при длительных измерениях температуры в пределах 400—900° С. Это — *единственная термопара и притом советского производства, не требующая введения поправок на температуру свободного конца* (*холодных спаев*).

*Термопара Паллаплат* не подвержена воздействиям окислительной среды, имеет бо́льшую термоэлектродвижущую силу, чем термопара Ле-Шателье и значительно дешевле последней. Термопара применяется для измерения температур до 1250°.

*Термопара платина-платина-родий* отличается хорошей характеристикой и необыкновенным постоянством термоэлектродвижущей силы. Применяется для измерения температур кратковременных до 1600° и постоянных до 1200—1300° С. Для нормальной ее работы необходимо наличие окислительной или нейтральной среды. Термопара очень чувствительна к действию паров мышьяка, кремния и фосфора, а также восстановительной атмосферы. Платиновый термоэлектрод при температуре выше 1000° легко подвергается явлениям разъедания и при длительном нагреве при температурах 1250—1350° кристаллизуется, становится ломким и распадается.

*Термопара платина-платина-родий-рений* имеет вполне удовлетворительную характеристику и некоторое преимущество перед пирометром Ле-Шателье, заключающееся в развиваемой ею значительно более высокой термоэлектродвижущей силе, более чем в два раза превосходящей пирометр Ле-Шателье. Предел измерения для кратковременных испытаний до 1600°, для длительной же работы до 1200 — 1250°С. Свыше 1200° появляется распыление. Термопара требует наличия окислительной среды и подвержена воздействиям водорода, сернистых, фосфористых и других газов, а также восстановительной среды.

*Графит-вольфрамовая термопара* характеризуется довольно высокой термоэлектродвижущей силой, хорошей чувствительностью и надежностью в работе до 1900—2000°. Недостатки ее: наличие легко ломающейся графитовой трубки (термоэлектрода), а также грузной армировки, вызываемой необходимостью поддерживать графитовую трубку в восстановительной атмосфере, а вольфрамовую — в нейтральной.

*Термопара углерод-карбид силиция* является наиболее интересной для измерения температур до 1800—2000° в промышленных условиях и до 2400° для лабораторно-исследовательских работ. Оригинальность ее конструкции (она изготовлена исключительно из высокоогнеупорных неметаллических материалов) и развиваемая ею совершенно исключительная термоэлектродвижущая сила, превышающая почти в 30 раз силу термопары Ле-Шателье, ставит ее на одно из первых мест среди существующих термопар. Благодаря этим своим достоинствам термопара отличается высокой огнеупорностью, не подвергается воздействию расплавленного черного металла и шлаков, обладает большим постоянством показаний, надежностью в работе и взаимозаменяемостью. Единственный ее недостаток — это наличие хрупкой углеродистой трубки. Эта термопара нашла большое применение в США при измерении температур в металлургической промышленности, а также в орудийной промышленности при измерении температуры расплавленной стали в высокочастотных индукционных печах.

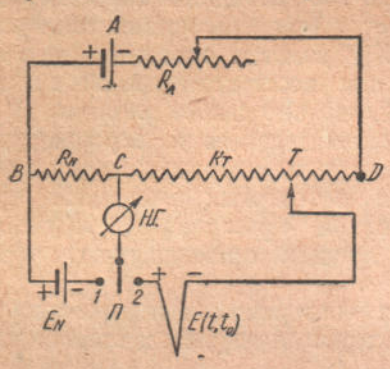


Рис. 349. Принципиальная схема измерения электродвижущей силы компенсационным методом.

Для устранения возможности соприкосновения между собою термоэлектродов, а также для защиты термопар от химических и механических воздействий, термопары армируются внутренними керамическими и наружными металлическими или керамическими защитными трубками.

Большое влияние на неизменяемость показаний и срок службы термопар оказывает неоднородность и загрязненность материала термоэлектродов, поэтому термопары, как общее правило, подлежат периодической проверке. В связи с тем, что термопары развивают крайне незначительные термоэлектродвижущие силы, доходящие для некоторых из них до 0,6 милливольт на 100°, измерительные приборы к ним должны быть высокой чувствительности, что со своей стороны обусловливает хрупкость конструкции прибора и механическую ненадежность работы его подвижной системы, ввиду крайне незначительных вращающих моментов. При измерениях в промышленной обстановке измерительным прибором в термоэлектрических пирометрах является магнито-электрический милливольтметр. Принципиальная схема пирометра дана на рис. 348. Развиваемый термопарой ток проходит через подвижную катушку *Е*, свободно вращающуюся в поле постоянного магнита *М*. Магнитная цепь замыкается посредством полюсных башмаков из мягкого железа *Б* и неподвижного железного сердечника *С*, вследствие чего в кольцевом зазоре, в котором вращается катушка, силовые линии направлены радиально. Вращающий рамку момент создается взаимодействием магнитного поля и тока, проходящего по виткам катушки. К последней прикреплена стрелка *У* и таким образом одновременно с катушкой перемещается и стрелка, указывающая по шкале прибора либо градусы либо милливольты. Поворот катушки зависит от силы тока и от упругого противодействующего момента пружинок, стремящихся вернуть катушку в начальное положение. Этот метод страдает, однако, рядом недостатков, происходящих вследствие изменения сопротивления цепи пирометра в зависимости от температур, быстрого износа отдельных элементов гальванометра и пр. Более точным является компенсационный метод измерения, указанный на рис. 349.

Принцип метода заключается в противопоставлении измеряемой термоэлектродвижущей силы переменной разности потинциалов на концах сопротивления.

В цепь аккумулятора включены регулируемое сопротивление $R_A$, сопротивление $R_N$, на которое замкнут нормальный элемент, и сопротивление $R$ (между точками $C$ и $D$), вдоль которого можно перемещать движок $T$. $E_N$ представляет нормальный элемент Вестона, электродвижущая сила которого известна. Обычно при 20° его э. д. с. равна 1,0183 *в* и уменьшается на 0,00004 *в* при увеличении температуры на 1°.

При включении переключателя $П$ на точку *1*, нуль-гальванометр вводится в цепь нормального элемента. Изменяют сопротивление $R_A$ в цепи аккумулятора, пока гальванометр не покажет отсутствия тока.

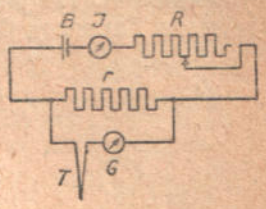


Рис. 350. Схема компенсационного включения по Линдек-Роту.

В таком случае сила тока $I$ в цепи $ABCDA$ равна:

$$I = \frac{E_N}{R_N}.$$

Затем переключатель $П$ ставят в точку *2*. Нуль-гальванометр включен теперь в цепь термопары, развивающей электродвижущую силу $E_{(t_1,t_0)}$ Перемещая движок $T$ вдоль $CD$, добиваемся нулевого положения стрелки гальванометра. В таком случае термоэлектродвижущая сила $E_{(t_1,t_0)}$ равна разности потенциалов на концах сопротивления $CT$ (обозначенного на рисунке через $R_T$). Следовательно

$$E_{(t_1,\, t_0)} = I \cdot R_T = E_N \frac{R_T}{R_N}.$$

Необходимым условием является постоянство силы тока в цепи аккумуляторной батареи. Поэтому, во время работы необходимо периодически контролировать силу тока в цепи, переключая ключ $П$ на контакт *1*.

Преимуществом компенсационного метода является высокая чувствительность и точность, а также независимость показаний от сопротивления соединительных проводов и термопары.

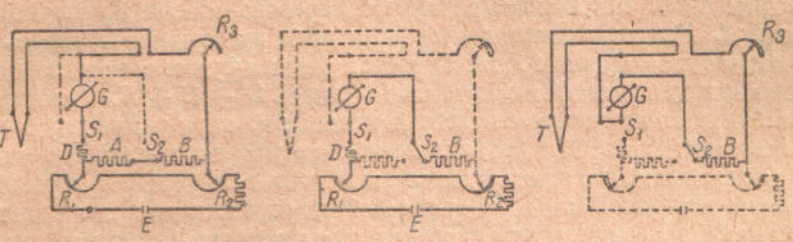


Рис. 351. Схема включения американского компенсационного прибора Heatmeter (Гаррисон-Фут) для трех включений, фирмы «Браун».

В данной схеме сила тока в цепи компенсатора остается постоянной, а изменяется сопротивление $R_T$, к концам которого приключается, посредством движка, компенсируемая электродвижущая сила.

Можно, наоборот, присоединить термопару к постоянному сопротивлению и изменять силу тока в цепи компенсатора до тех пор, пока нуль-гальванометр не покажет отсутствия тока.

Этот метод применен в компенсаторе Линдека и Рота.

Как видно из рис. 350, в данной схеме применены два прибора: очень чувствительный с подвесной нитью гальванометр $G$ (нуль-аппарат) и точный амперметр $A$ для измерения тока $I$, устанавливаемый регулирующим реостатом $R$ так, чтобы в нуль-аппарате не было тока. Если ток в цепи аккумулятора равен $i$ миллиампер, а нормальное сопротивление — $r$ *ом*, то скомпенсированная электродвижущая сила термопары равна $E = ir$ милливольт. Посредством переключателя можно устанавливать различные пределы измерения, а для проверки амперметра вместо термопары можно включать нормальный элемент Вестона. В таком случае амперметр в момент компенсации должен, в зависимости от по-

ложения переключателя, показывать точно 50, 100 и 150 миллиампер. Недостатками схемы Линдека и Рота являются ее громоздкость и наличие в ней двух высоко чувствительных, а следовательно и дорого стоющих измерительных приборов. С целью упрощения схемы Линдека американские ученые Гаррисон и Фут, а также наш советский ученый профессор Г. Кульбуш предложили компенсационные приборы «Heatmeter» и «Пирамметр». Существенным отличием конструкции этих приборов от прибора Линдека является замена нуль-аппарата и амперметра одним прибором, попеременно включенным, то как амперметр, то как нуль-аппарат. На рис. 351 показана схема американского прибора «Heatmeter» (системы Гаррисон-Фут) для трех включений. Первое включение изображает момент компенсации термоэлектродвижущей силы термопары разностью потенциалов аккумуляторной батареи в точках $S_1$ и $S_2$, осуществляемой посредством передвижения движков реостатов $R_1$ и $R_2$ до тех пор, пока стрелка гальванометра не установится на нуль, что указывает на отсутствие тока в гальванометре. Если ток, протекающий через $A$ и $B$, обозначим через $I$, то электродвижущая сила термопары в момент компенсации очевидно будет равна: $E = I \cdot (A + B)$.

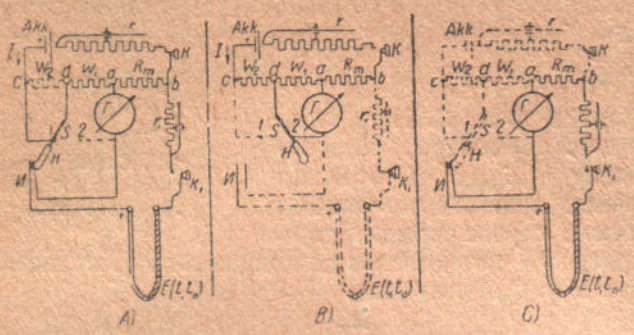


Рис. 352. Схема включения советского компенсационного прибора «Пирамметр» для трех включений, ленинградского завода «Пирометр».

Во втором включении аккумуляторной батареи производится измерение силы компенсационного тока, а следовательно и термоэлектродвижущей силы термопары. Включение осуществляется выключением цепи термопары ключом $S_1$ и включением цепи гальванометра путем перевода ключа $S_2$ из положения *1* в положение *2*. Разность потенциалов во втором включении осталась без изменения, так как сопротивление $A$ подбирается равным сумме сопротивлений $G + D$. Сопротивление в цепи гальванометра равно теперь $D + G + B$. Показания гальванометра будут соответствовать действительности, если температура термопары остается без изменения. Так как это изменение при включенной термопаре установить невозможно, то третье включение дает возможность производить отсчеты электродвижущей силы термопары непосредственно по гальванометру, после того как погрешности от сопротивления проводки будут уравнены. Включение осуществляется переводом переключателя $S_1$ из положения *1* в положение *2*, отчего цепь аккумуляторной батареи выключается, а цепь термопары включается в цепь с гальванометром. Сопротивление $R_3$ меняется до тех пор, пока сопротивление цепи гальванометра не станет равным сопротивлению при втором включении.

Тогда:

$$D + G + B = R_T + R_{ком} + R_3 + B + G.$$

Таким образом, при точно отрегулированном сопротивлении $R_{реост}$, «Heatmeter» Брауна служит показывающим прибором, непосредственно указывающим истинную электродвижущую силу или температуру термопары, при условии, что сопротивление термопары и электрической коммутации ($R_{термоп} + R_{ком}$) остались без изменения.

Сущность конструкции нашего советского компенсационного прибора пирамметра профессора Кульбуша, изображенного на рис. 352, в основном, заключается в нижеследующем: в первом включении ток от аккумулятора протекает по цепи $AkkIcSdW_1aR_mbKrAkk$. Регулируемая реостатом $r$ сила тока создает в точках $a$ и $b$ изменяющуюся по желанию разность потенциалов. Термоэлектродвижущая сила термопары подводится к точкам $a$ и $b$, причем цепь термопары приключается при помощи ключа $k$. В цепи термопары включен

еще размыкатель и, который в данном включении замкнут рычагом $H$. Включенный в цепь термопары гальванометр $Г$ при помощи ключа $k$ показывает, скомпенсирована ли термоэлектродвижущая сила $E(t, t_0)$ термопары.

В момент компенсации термоэлектродвижущая сила термопары равна:

$$E(t_1, t_0) = IR_m.$$

Во втором включении цепь термопары отключается посредством освобождения рычага $H$ размыкателя $U$. Гальванометр $Г$ включен здесь параллельно сопротивлению $W_1$, так что часть тока $I$ ответвляется в гальванометр, по отношению к которому $W_1$ является шунтом. Кроме того, в этом включении цепи аккумулятора входит сопротивление $W_2$, замкнутое накоротко в первом включении переключателем $S$. Во втором включении на участке $da$ ток аккумулятора $I$ разветвляется в точке $d$ на токи: $i_W$, протекающий через $W_1$ и $i_r$, протекающий через гальванометр, так что:

$$I = i_W + i_r, \tag{2}$$

$$\frac{i_r}{i_w} = \frac{W_1}{R_Г}, \tag{3}$$

где $R_Г$ — сопротивление гальванометра. Из уравнений (2) и (3) имеем:

$$i_r = \frac{I}{1 + \frac{R_Г}{W_1}}.$$

Сопротивление $W_2$ имеет целью поддерживать сопротивление аккумуляторной цепи постоянным; сопротивление между точками $d$ и $a$ во втором включении равно $\frac{W_1 \cdot R_Г}{W_1 + R_Г}$, вследствие параллельного включения гальванометра. Сила тока $I$ в первом и втором включении может оставаться одинаковой при условии, что

$$W_2 = W_1 - \frac{W_1 - R_Г}{W_1 + R_Г} = \frac{W_1^2}{W_1 + R_г}.$$

Третье включение характеризующее пирамметр в качестве указывающего гальванометра, отличается от первого включения тем, что, несмотря на совпадение положения переключателя $S$, ключ $k$ разомкнут, а ключ $k_1$ замкнут. В результате этого в аккумуляторе ток отсутствует и развиваемая термопарой электродвижущая сила создает ток, протекающий через гальванометр и вызывающий отклонение стрелки последнего. Отклонение стрелки зависит от термоэлектродвижущей силы термопары и суммы сопротивлений $R_Г + R_m + r_1 + R_{вн}$, где $r_1$ — сопротивление регулировочного реостата, а $R_{вн}$ — сопротивление термопары и электрической коммутации, так что, регулируя сопротивление $r_1$, можно изменять показания прибора. Компенсационный прибор пирамметр изготовляется Ленинградским заводом «Пирометр» на несколько пределов измерения.

Возникновение погрешностей в показаниях термоэлектрических пирометров возможно от целого ряда причин, как то:

1) От изменения сопротивления термопары и электрической проводки и благодаря переходным сопротивлениям.

2) От влияния температуры свободного конца термопары.

3) От возникновения в цепи термопары паразитных токов.

4) От погрешности измерительного прибора.

5) От неправильной установки термопары в месте замера температуры.

*Погрешность от сопротивления термопары и соединительных проводов.* В крупных промышленных предприятиях, оборудованных центральными измерительными станциями, диспетчерскими пунктами и пр. показывающие и самопишущие гальванометры расположены на значительном расстоянии от места установок термопар. В таких случаях сопротивление электрической коммутации может влиять на показания прибора в том смысле, что температура, показанная прибором, будет ниже истинной, существующей в месте измерения.

Эту погрешность от сопротивления термопары и электрической коммутации можно вычислить или установить соответствующей установкой.

Сопротивление внешней цепи измеряется путем параллельного включения сопротивления $r_p$ и наблюдением снижения показаний милливольтметра. Расчет сопротивления производится следующим образом:

1) Если $r$ незначительно по сравнению с $R$, то

$$r = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1\right)\frac{R \cdot r_p}{R + r_p}$$

или $r = r_p\ (n - 1)$, если $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ не слишком велико, где $n = \frac{d_1}{d_2}$

2) Если $r_p = R$, то

$$r = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1\right) \cdot \frac{R}{2},$$

Здесь $r$ — сопротивление термопары и проводки,
$R$ — сопротивление милливольтметра,
$r_p$ — сопротивление шунта,
$\alpha_1$ — отклонение прибора и милливольтах при выключенном сопротивлении
$\alpha_2$ — отклонение прибора в милливольтах при включенном сопротивлении.

Для определения истинной температуры в месте измерения и величины погрешности и необходимых поправок можно пользоваться следующим расчетом:

$$E_u = E_y\left(\frac{R + r}{R}\right)\ мв, \qquad (1)$$

где $E_u$ — электродвижущая сила термопары в милливольтах,
$E_y$ — напряжение, указываемое милливольтметром,
$R$ — сопротивление милливольтметра,
$r$ — сопротивление термопары, компенсационных и соединительных проводов.

*Влияние температуры свободного конца термопары.* Как было сказано выше, термоэлектрические пирометры показывают разность э. д. с. рабочего и свободного концов, следовательно при измерении температур необходимо иметь тщательное наблюдение за температурой свободного конца термопары. Заводы, изготовляющие пирометры, обычно поставляют их отградуированными при температуре свободного конца в 20° С, поэтому при пользовании пирометрами при иной температуре свободного конца необходимо вносить поправки в их показания.

Действительная температура рабочего конца термопары равна:

$$t - t' = k\ (t_0' - t_0), \qquad (2)$$

где $t$ — температура рабочего конца термопары,
$t'$ — температура, показанная гальванометром,
$k$ — поправочный коэфициент на температуру свободного конца термопары,
$t_0'$ — температура свободного конца термопары,
$t_0$ — градуировочная температура свободного конца термопары.

С целью избежать влияния температуры свободного конца термопары на показания прибора применяются компенсационные провода. Последние служат для удлинения термопары с целью вывести ее свободный конец в место с не меняющейся температурой. Компенсационные провода для термопары из неблагородных металлов обычно состоят из тех же материалов, что и термоэлектроды, но более тонкого сечения. Для термопар из благородных металлов компенсационные провода изготовляются из одного медного провода и одного из специального медно-никелевого сплава и имеющего при низких температурах (до 500° С) температурную кривую, аналогичную кривой платина-платино-родиевой термопары. (Медный провод приключается к платино-родиевому электроду, провод из медно-никелевого сплава — к платиновому). Необходимо, однако, отметить,

что при использовании компенсационных проводов на большом протяжении, сопротивление коммутационной линии значительно возрастает, так как сопротивление компенсационных проводов гораздо выше медных. В промышленных предприятиях порой затруднительно найти место с постоянной температурой. В таком случае свободный конец помещается в термостат, температура которого регулируется. Иногда в промышленных предприятиях, где под рукой имеется сжатый воздух, последним пользуются для охлаждения температуры свободного конца термопары. Если имеется в виду стационарная пирометрическая установка, то весьма целесообразный и удобный способ поддержания температуры свободного конца термопары неизменной — закопать его в землю на глубине нескольких метров, где средняя годовая температура в зависимости от климатических условий равна, примерно, 10—12°, а среднее годовое колебание составляет не более $\pm 1°$. Для защиты от влажности компенсационные провода таких термопар помещаются в железную трубку с заваренным дном, сверху трубка закрывается пробкой и заливается специальной массой для защиты от сырости. Этот метод является наиболее эффективным для поддержания температуры свободного конца на одинаковом уровне. Если установка производится в печных цехах, то компенсационный провод следует закопать подальше от печи, примерно, на расстоянии не менее 3—4 *м* от печи.

*Погрешности, обусловленные прибором.* Показания прибора изменяются с температурой окружающей среды, так как сопротивление рамки прибора возрастает с температурой. Температурный коэфициент рамки, обычно изготовляемый из алюминия или меди, равен 0,4% на 1° С изменения температуры прибора. Если сопротивление рамки обозначить через $R_p$, а добавочное сопротивления через $R_g$, то температурный коэфициент $\beta$ прибора будет равен $\beta = \frac{0{,}004 \cdot R_p}{R_p + R_g}$, так как добавочное сопротивление изготовляется из манганина, имеющего температурный коэфициент 0,00001. Уменьшить температурный коэфициент прибора можно также применением шунта переменной магнитной проницаемости. Последний оттягивает часть потока из междужелезного пространства и таким образом увеличивает поток рассеяния магнита. При нормальной температуре окружающей среды в шунт ответвляется значительная часть магнитного потока, вследствие чего поле в междужелезном пространстве ослабляется. При повышении температуры окружающей среды магнитный шунт ответвляет меньшую часть магнитного потока, и поле в междужелезном пространстве усиливается. Вследствие этого снижение вращающего момента подвижной катушки от ослабления тока при нагреве прибора компенсируется увеличением магнитного потока в междужелезном пространстве, в виду чего колебания температуры окружающей среды не оказывают влияния на показания гальванометра. Заводом «Пирометр» в Ленинграде применяется магнитный шунт из измельченных медно-никель-серных сплавов, спрессованных на бакелитовой основе. Гальванометры с такими шунтами обладают температурным коэфициентом в пределах 0,00—0,02% на 1° С.

*Погрешность от неоднородности и изменения химического состава термоэлектродов.* Неоднородность термоэлектродных материалов также вызывает погрешность в показаниях пирометров. По исследованиям ряда ученых погрешность в показаниях из-за неоднородности термоэлектродов, в особенности для никель-нихромовых термопар, в пределах температур 800° С, может доходить до $\pm 1\%$.

Хотя при старении термопары термоэлектродвижущая сила ее изменяется незначительно, но при ответственных и особо точных измерениях необходимо следить за этим изменением. Основным моментом, влияющим на старение термоэлектродов, является не столько изменение их сопротивления, сколько их кристаллическое превращение, а также появление дополнительных вредных термоэлектродвижущих сил, в результате образования новой термопары из окиси и металла.

*Погрешность от неправильной установки пирометра.* По мысли, высказанной в свое время проф. Кноблаух и инж. Генки, всякий температурный измеритель, помещенный в среду измеряемой температуры, представляет в последней

инородное тело, которое отводит или подводит теплоту и тем вызывает искажение действительной температуры измеряемой среды. Как правило, погрешности от неправильной установки пирометра в большинстве случаев снижают показания гальванометра. В некоторых случаях, как например, при измерении температуры газов, протекающих по трубопроводу, наблюдается весьма заметная разница между температурой, показанной пирометром, и действительной температурой газа. Эта погрешность, достигающая порой при весьма незначительной скорости газа совершенно исключительной величины 30%, обусловливается следующими явлениями:

1. Незначительной скоростью газового потока.

2. Излучением нагретой термопары и горячих газов к стенкам трубопровода, что вызывает нарушение равенства температур пирометра и газа, так как температура стенок и газа неодинакова.

3. Плохой кладкой или обмуровкой агрегата.

Учитывая то исключительно важное значение, какое представляет точное измерение температуры в газовой среде преимущественно для металлургической промышленности, считаем необходимым остановиться несколько подробнее на рассмотрении указанных выше явлений.

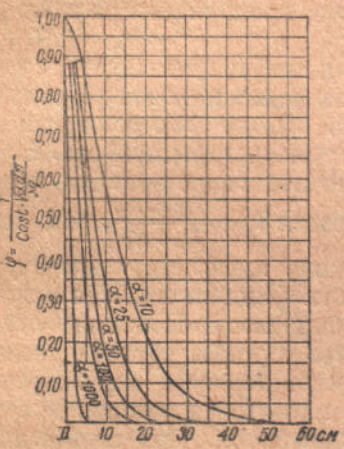



Рис. 353. Зависимость между коэфициентом теплопередачи и длиною погружательного конца термопары.

Погрешности измерения $\Delta t$, обусловливаемые незначительной скоростью протекания газа $v$, по исследованиям Кноблаух и Генки, в железной трубе диаметром 60 *мм*, по которой протекал горячий воздух при 200° С, при разных скоростях воздуха равны:

1) Для неизолированного трубопровода:

| | | | |
|---|---|---|---|
| при | $v = 5$ | 10 | 30 *м/сек* |
| | $\Delta t = 47{,}1$ | 27,9 | 8,6° С |

2) Для того же трубопровода, изолированного фасонными кирпичами при толщине изоляции 60 *мм*:

| | | | |
|---|---|---|---|
| при | $v = 5$ | 10 | 30 *м/сек* |
| | $\Delta t = 17$ | 10 | 4,4°С |

Глубина погружения термопары также оказываетвлияние на точность измерения. На рис. 353 дана зависимость между коэфициентом теплопередачи $\alpha$ и длиной погружательного конца термопары. На оси абсцисс отложены длины погружательного конца термопары, а на оси ординат — величины коэфициента $\varphi$, соответствующего различным значениям коэфициента $\alpha$ и представляющего собою погрешности при измерении. Как нами раньше было указано, из других явлений, вызывающих погрешность при измерениях в газовой среде, являются излучения термопары и газа. Температурное равновесие наступает в тот момент, когда количество теплоты, передаваемое газом рабочему концу термопары, становится равным количеству теплоты, излучаемому рабочим концом термопары к стенкам трубопровода и отводимому путем теплопроводности от рабочего конца вдоль термопары к ее головке. В виду незначительной погрешности от оттока вдоль термопары при длине последней свыше 100 *мм*, этой погрешностью можно пренебречь. Примем, что участок термопары вблизи рабочего конца находится при одинаковой с последним температуре. Если обозначим через $T_г$ — действительную абсолютную температуру газа, $T_m$ — температуру рабочего конца и $T_c$ — температуру стенки внутри трубопровода, $\alpha$ — коэфициент теплопередачи, $C$ — коэфициент лучеиспускания, через $F_m$ — поверхность рабочего конца термопары, то по закону Стефан-Больцмана тепловой баланс последней равен:

$$\alpha F_m (T_г - T_m) = F_m \cdot C \left[ \left(\frac{T_m}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_c}{100}\right)^4 \right], \qquad (1)$$

откуда разность температур между газом и рабочим концом равняется:

$$T_г - T_m = \frac{C}{\alpha}\left[\left(\frac{T_m}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_c}{100}\right)^4\right]. \qquad (2)$$

Коэфициент лучеиспускания $C$ в формуле (2) для абсолютно черного тела равен 4,96 $\frac{ккал}{м^2 час (°C)^4}$. В данном случае величину $C$ можно принять близкой к ее значению для абсолютного черного тела. Коэфициент $\alpha$ повышается с увеличением скорости движения газа и повышением температуры последнего. Уравнение (2), хотя и не дает возможности количественно определить действительную температуру газа, тем не менее указывает пути для уменьшения погрешности показания. Это снижение погрешности достигается увеличением $\alpha$ путем повышения скорости движения газов либо уменьшения разности между температурой газа $T_г$ и температурой внутренней стенки трубопровода $T_c$. Снижение погрешности по последнему способу достигается применением экранирующего приспособления, которое препятствует лучистому теплообмену пирометра со стенками трубопровода. Это экранирующее приспособление представляет собою полированную тонкостенную металлическую трубку, внутри которой помещается рабочий конец термопары. Обозначим через:

$F_в$ и $F_н$ — соответственно внутреннюю и наружную поверхность экрана,
$T_в$ и $T_н$ — температуры внутренней и наружной его поверхности,
$\delta$ — толщину его стенки,
$\lambda$ — коэфициент теплопроводности материала экрана,
$\alpha_1$ и $\alpha_2$ — коэфициенты теплопередачи между газом и внутренней и наружной поверхностью экрана.

Совершенно очевидно, что общее количество теплоты, перешедшей от газа к внутренней и наружной поверхности экрана, должно быть равным количеству теплоты, излученному наружной стенкой экрана, к внутренней стенке трубопровода, т. е.:

$$Q = \alpha_1 F_в (T_г - T_в) + \alpha_2 \cdot F_н (T_г - T_н) = C \cdot F_н \left[\left(\frac{T_н}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_в}{100}\right)^4\right]. \qquad (3)$$

Количество теплоты, перешедшее от газа к внутренней поверхности экрана, должно пройти через стенки последнего.
Тогда

$$\alpha_1 \cdot F_в (T_г - T_в) = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{F_в + F_н}{2} (T_в - T_н). \qquad (4)$$

Для величины поверхности в правой части равенства (4) для упрощения дано среднее арифметическое значение между $F_в$ и $F_н$. Исключая величину $T_н$ из левой части уравнения (3), получаем следующее значение для потери количества теплоты $Q$ от лучистого теплообмена:

$$Q = (T_г - T_в)\left[\alpha_1 \cdot F_в + \alpha_2 \cdot F_н \left(1 + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{2\alpha_1 \cdot F_в}{F_в + F_н}\right)\right]. \qquad (5)$$

Если применяются тонкостенные экраны ($\delta \cong 0$) с высоким коэфициентом теплопроводности, то выражение (5) упрощается, так как тогда можно допустить $T_в = T_н$ и $F_в = F_н$,
а именно:

$$Q = (\alpha_1 + \alpha_2)\, F_н (T_г - T_н). \qquad (6)$$

При сравнении результатов измерения температуры обыкновенной термопарой и снабженной экранирующим приспособлением в жаровой трубе парового

котла (полагая в первом приближении $\alpha_1 = \alpha_2 = 20$ *ккал/м² · час* и коэфициент $C = 4$), были получены следующие температуры

| | Обычная термопара | Термопара экранирующим приспособлением |
|---|---|---|
| Температура стенки жаровой трубы | 170 | 170 |
| Средняя температура экранирующего приспособления | — | 500 |
| Температура, показанная термопарой | 600 | 660 |
| Истинная температура газа | 818 | 820 |

Как видно из таблицы, несмотря даже на защиту термопары тонким экранирующим приспособлением, повышение показаний пирометра составляет всего лишь 60°, следовательно погрешность все еще была очень велика и составляла, примерно, около 160°, т. е. около 20%. Объясняется это чрезвычайной интенсивностью излучения при высоких температурах. Значительно лучше складываются условия измерения при блестящих экранах и при измерениях умеренных температур (порядка 600°). В последних случаях погрешность показаний удается значительно снизить. Дальнейшим мероприятием по приближению показания пирометра и действительной температуре газа является повышение коэфициента теплопередачи $\alpha$ от газа к пирометру путем увеличения скорости движения газа, хотя бы на участке трубопровода, примыкаемому к месту установки термопары. Усиленная циркуляция газа в среде, не находящейся под положительным давлением, осуществляется посредством специальных насосов, отсасывающих измеряемый газ по трубке (незначительного диаметра), окружающей термопару, причем в некоторых конструкциях отсасывающих пирометров предельная скорость движения газа доведена до 200 и выше *м* в секунду. Вентцель предложил подогревание стенок экрана с целью довести потери термопары от излучения до минимума. Им был сконструирован отсасывающий пирометр с экраном, снабженным внутри рядом стеатитовых трубок, помещенных между отсасывающей трубкой и термопарой, с целью увеличения поверхности экрана. Таким образом, путем комбинированного применения экрана и отсасывания газа можно добиться удовлетворительных результатов измерения. Действительно, погрешность в показаниях прибора будет тем меньшая, чем незначительнее разность температур газа и окружающей термопару отепляемой стенки. Эта разность температур из уравнения (6) равна:

$$T_г - T_в = \frac{C \cdot F_н \left[\left(\frac{T_н}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_в}{100}\right)^4\right]}{\alpha_в \cdot F_в + \alpha_н \cdot F_н + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{2\alpha_2 \cdot \alpha_1 \cdot F_н \cdot F_в}{F_в + F_н}}. \qquad (7)$$

Если разделим числитель и знаменатель уравнения (7) на $F_н$, тогда, обозначив $\frac{F_в}{F_н}$ через $f$, получим:

$$T_г - T_в = \frac{C\left[\left(\frac{T_н}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_в}{100}\right)^4\right]}{\alpha_1 f + \alpha_2 + 2 \cdot \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot F_в}{F_в + F_н}}. \qquad (8)$$

Следовательно, увеличение $F_в$ при неизменном $F_н$ оказывает то же влияние, что и повышение коэфициента теплопередачи $\alpha_1$. Одной из распространенных конструкций отсасывающих пирометров является пирометр Г. Шмидта (изготовляемый фирмой «Гереус»), показанный на рис. 354. Для защиты от лучеиспускания термопара *C* помещена в трубку *b*, отепляемую током низкого напряжения. Отсос газа производится эжектором *d*. При сравнительном измерении температур в газовых и воздушных камерах мартеновской печи обыкновенными и отсасывающими пирометрами были получены следующие результаты: при действительной температуре газа в 1340,° 1150°, 1320° и 1135°, пирометр Шмидта показал соответственно: 1275°, 1230°, 1270° и 1215°; обыкновен-

ный же пирометр показал: 1100°, 1050°, 1090° и 1060°. Значительно лучшие результаты получаются при измерении отсасывающими пирометрами температуры газов порядка 800—900° С. Так, при действительной температуре газа в 793° С, отсасывающий пирометр Вентцеля показал 788° С, обыкновенный же пирометр показал только 600°.

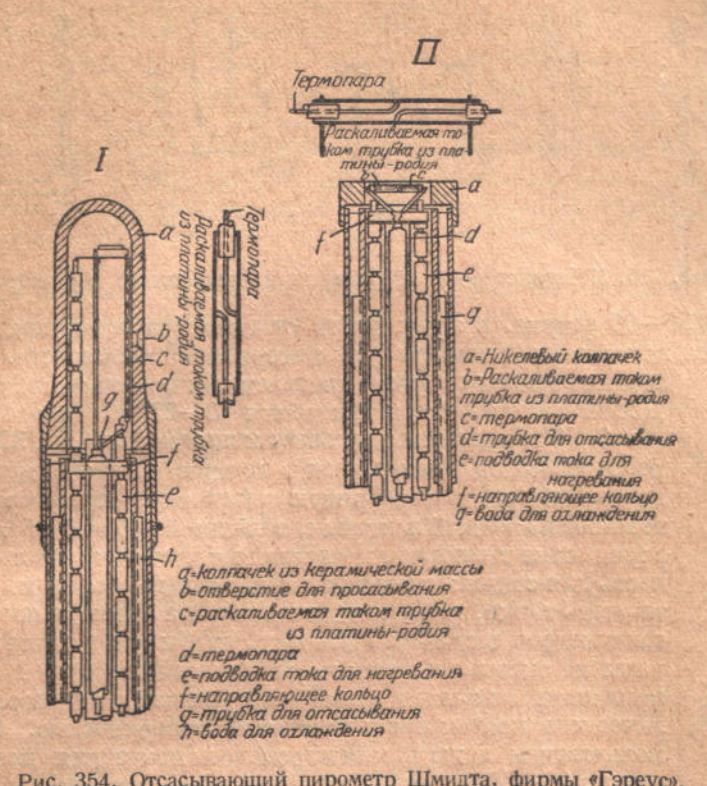



Рис. 354. Отсасывающий пирометр Шмидта, фирмы «Гэреус».

**§ 122. Измерение температуры металлических поверхностей.** Измерение температуры металлических поверхностей представляет исключительный интерес, главным образом, для металлургической и машиностроительной промышленности, где такой контроль температуры совершенно необходим при прокате рельс, труб и листов, а также при горячей ковке и штамповке металлических изделий. Следует, однако, констатировать, что измерение температур поверхностей твердого тела представляет одну из наиболее трудно разрешимых задач в технике измерения высоких температур, так как температура всякого нагретого тела отличается от температуры окружающего воздуха, с которым поверхность тела находится в постоянном, интенсивном теплообмене. Вместе с тем вследствие наличия на поверхности тела термопары происходит отток тепла вдоль последней. Кроме того, для прокатки и ковки металлов и сплавов, трудно поддающихся обработке, с ограниченным температурным режимом последней, особенно важно, чтобы производственный процесс начинался при оптимальной температуре и контроль последней должен вестись непрерывно в особенности при ковке, процессе, сопряженном с охлаждением и последующим подогревом обрабатываемых слитков и деталей в отжигательных печах. Таким образом при измерении температуры поверхностей твердых тел следует, учитывая необходимость получения быстрых показаний, пользоваться особенно чувствительными температурными измерителями с пределом измерения, соответствующим фактическому пределу измерения температуры данного объекта. Необходимо также обратить самое серьезное внимание на тщательную установку термопары. Из наиболее распространенных конструкций термопар для измерения температур поверхностей, оправдающих себя в промышленной практике, считаем необходимым остановиться на нижеследующих:

1. *Термопары с конусообразным или шарикообразным рабочим концом*, погружаемые в предварительно просверленное в измеряемой поверхности соответственное отверстие (рис. 355). Для получения показаний этой термопары

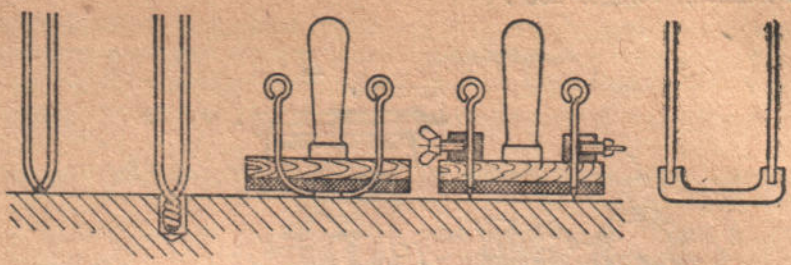


Рис. 355. Конструктивные оформления поверхностных пирометров.

требуется от 30—90 секунд, в зависимости от диаметра термоэлектродов, пока рабочий конец воспринимает температуру измеряемой поверхности. Этот промежуток времени слишком длителен для производственных замеров. Достигаемая точность измерения 10—22° С при 450° С.

Рис. 356. Накладной пирометр для измерения температуры поверхности, фирмы «Сименс и Гальске».

2. *Так называемые накладные пирометры* (рис. 356), у которых рабочий конец помещается в тонкую, плоскую, металлическую, преимущественно серебряную пластинку. Часто термопару изготовляют из тонкой ленточки, толщиной 0,02—0,05 *мм*. В таком случае сама термопара представляет достаточно большую поверхность для соприкосновения с измеряемым объектом. Так как лента очень тонка, то соприкосновение на расстоянии нескольких сантиметров достаточно для того, чтобы отвод тепла вдоль термопары не оказывал влияние на измерение. К этой конструкции приделана нажимная ручка для установления хорошего металлического контакта с измеряемой поверхностью. Однако, при пользовании даже таким пирометром показания получают лишь спустя 20—30 секунд. Достижимая при измерениях точность показания составляет около 15° С, в зависимости от диаметров термоэлектродов.

На основании исследований Клауса и Газе можно прийти к заключению, что при измерении температур металлических поверхностей, хороших проводников тепла, погрешность возрастает пропорционально диаметру термоэлектродов. При измерении температур поверхностей плохих проводников тепла погрешность получается большая даже при измерении тонкими термоэлектродами. Эту погрешность можно уменьшить посредством увеличения отвода тепла с измеряемого объекта на рабочий конец термопары, что проще всего осуществить, придав рабочему концу форму конуса или шарика, помещаемого внутри измеряемой поверхности. По данным Клауса и Газе погрешность при температуре в 170° С термоэлектродами диаметром в 3 *мм* составляет:

| Объект измерения | Погрешность в °С | Инерция в показаниях прибора в секундах |
|---|---|---|
| Серебряная пластинка диаметром в 10 *мм*, толщиной 1 *мм* на медной плите | — 13,8 | 55 |
| Та же серебряная пластинка на мраморной плите | — 41 | 61 |
| Железный конус, диаметром 10 *мм*, вставленный в мраморную плиту | — 22 | 82 |

Профессором А. Цеерледером предложена чрезвычайно простая конструкция поверхностного пирометра, которая основана на следующем: если к какому-

нибудь металлическому телу припаять никелевую и нихромовую проволоку, и если оба места спая будут находиться при одинаковой температуре, то развиваемая этой температурой термоэлектродвижущая сила будет такой же, как если бы никелевый и нихромовый термоэлектроды были непосредственно сварены в рабочем конце (без постороннего металла). На основании этого проф. Цеерледер сконструировал термопару, рабочим концом которой является металлический слиток, температура которого подлежит измерению. Разновидностью этой конструкции является пирометр, состоящий из коротких никелевого и нихромового термоэлектродов, диаметром 2,5 *мм*, изолированных в месте прохода и заостренных на концах. При помощи рукоятки эти острия прижимаются к поверхности измеряемого металла, с которым устанавливается таким образом контакт. Благодаря такой конструкции термопары, показания получаются чрезвычайно быстро В связи с незначительной длиной термоэлектродов необходимо снабдить термопару компенсационными проводами соответствующей длины в целях устранения возможной погрешности из-за высокой температуры окружающей среды.

§ 123. **Дилятометрические пирометры**. Пирометры, основанные на принципе линейного расширения и сжатия твердых тел системы профессора Шевнара, нашли большое применение в металлургической и машиностроительной промышленности как при измерении и регулировании высоких температур, так и при термическом анализе металлов и их сплавов. Профессором Шевнаром сконструирован ряд интереснейших приборов, применяемых как самописцы термических циклов различных сплавов, терморегуляторы, диференциальные пирометры и пр. Не имея возможности дать описание всех приборов конструкции проф. Шевнара, считаем необходимым остановиться лишь на тех из них, которые относятся лишь к области измерения и регулирования высоких температур.

*Показывающий пирометр.* В основном конструкция пирометра заключается в следующем: в дно кварцевой трубки *T*, наглухо закрытой с одного конца, помещается стержень диаметром в 5—7 *мм* из специального сплава «пирос» *E*, расширение и сжатие которого передается кварцевым стержнем *t* и рычажным механизмом *C* стрелке прибора *L*, насаженной на ось часового механизма. Сплав «пирос» состоит из никеля, хрома и вольфрама с присадкой марганца и железа и обладает высоким коэфициентом линейного расширения, превосходящим почти в 30 раз расширение кварца, и отличается большой твердостью. Один конец кварцевой трубки заделывается и сваривается с пробкой из кварца, благодаря чему вся конструкция обладает большой прочностью и имеется возможность применить довольно сильные рессорные пружины, необходимые для преодоления трения отдельных элементов пирометра и уменьшить в значительной степени влияние усталости металла, сведя его до нескольких грамм на *мм*$^2$. В результате этого достигается весьма незначительная вязкая деформация эталона «пирос» и кварцевых частей пирометра. Расширение указывающего прибора и рычажного механизма компенсируются соответственным подбором их габаритов и коэфициентов расширения. Вследствие того, что стрелка прибора изготовлена из сплава «инвар», колебания температуры окружающей среды не оказывают влияния на точность показаний пирометра. Открытым концом кварцевая трубка помещается в латунную муфту, в которую заделывается специальной пластической массой. Пирометр соединяется с указывающим прибором другой муфтой, скрепленной винтом с первой (рис. 357). Чтобы привести в движение стрелку прибора, достаточно ослабить крепежный винт и слегка повернуть трубку пирометра вокруг своей оси. Эта простая манипуляция облегчает как первоначальную регулировку прибора, так и проверку нуля прибора после продолжительной его работы. Как правило, проверку нуля необходимо производить, установив предварительно пирометр в намечаемое рабочее положение и установив стрелку прибора на температуру окружающей среды. Смещение нулевого положения стрелки обычно совершенно незначительно, даже после длительной работы при температуре до 1000° С. Продолжительная работа пирометра при температурах в 1100° С вызывает довольно заметную вязкую деформацию стержня «пирос» и погрешность показания около 4° С на каждый

час работы. Следовательно, пирометром Шевнара можно пользоваться для измерения температур до 1000° С и кратковременно до 1100° С, т. е. для теплотехнических агрегатов, цементационных, закалочных и прочих печей, применяемых для термической обработки металлов и сплавов. Благодаря очень тщательной обработке оси, механический гистерезис прибора Шевнара совершенно незначителен. На случай армировки пирометра необходимо, чтобы защитная трубка скреплялась с пирометром не в головной его части по следующим соображениям.

1) Удары и толчки будут передаваться армировкой кварцевой трубке и указывающему прибору.

2) При непосредственном контакте с прибором, ввиду теплопроводности муфеля, возможен перегрев механизма прибора при высоких температурах.

3) Деформация муфеля при высоких температурах может вызвать поломку кварцевой трубки. По этим соображениям пирометр рекомендуется армировать лишь на половину его длины, причем между обеими трубками должен быть оставлен достаточный зазор и в дно армировочной трубки необходимо поместить азбестовую пробку, во избежание порчи пирометра при толчках и сотрясениях.

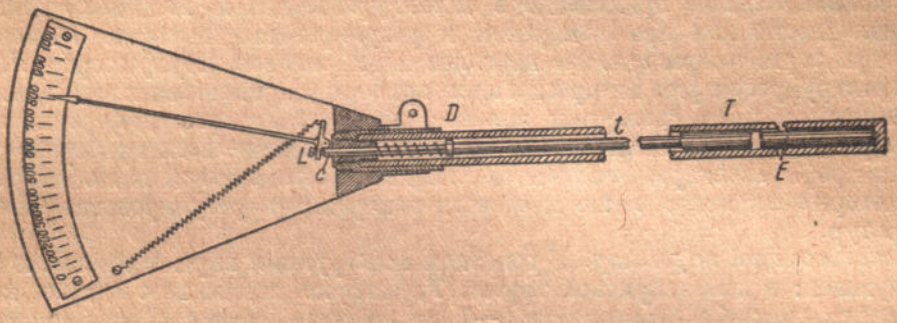



Рис. 357. Дилятометрический пирометр проф. Шевнара и фирмы «Коммантри-Фуршамбо-Деказвиль».

Монтаж пирометров рекомендуется производить в вертикальном положении, так как в горизонтальном положении возможно провисание трубки при высоких температурах.

Специальный сплав «пирос» отличается твердостью, малой окисляемостью при высоких температурах и высоким коэфициентом линейного расширения, причем термические свойства его обратимы. Поломавшаяся кварцевая трубка может быть сменена в течение нескольких минут.

*Пирометр с сигнализацией и терморегулированием.* Этот пирометр является конструктивным видоизменением показывающего, в конструкцию которого внесены следующие дополнительные элементы: два боковых упора ($B_1$ и $B_2$), надежно изолированные от корпуса прибора, вращаются на оси, являющейся продолжением оси часового механизма. К каждому упору прикреплены два гибких серебряных контакта. Против каждого упора на наружной части корпуса устанавливается контрольная стрелка $I_1$ и $I_2$, которую устанавливают на критическую заранее задаваемую температуру. Нижняя контрольная стрелка соответствует максимальной температуре, верхняя — минимальной. Как только стрелка указывающего прибора достигает одной из критических температур и коснется контактов $L_1$ или $L_2$, цепь замыкается и включается либо сигнализация, либо реле терморегулятора (рис. 359). Это реле имеет целью поддерживать температуру регулируемого источника тепла на одинаковом уровне, меняя силу тока, если речь идет об электрической печи, либо изменяя расход топлива, если объектом измерения является обыкновенная промышленная печь. Совершенно очевидно, что эта конструкция вполне аналогична конструкции электрических терморегуляторов с максимальным и минимальным контактами, но выгодно отличается от последних своей несложностью, простотой и отсутствием множества деталей. Благодаря большим силам, развиваемым расширением пирометра, осуществляется плотный и надежный контакт. Двойной серебряный

контакт обеспечивает бесперебойную работу сигнализации на случай загрязнения или окисления одного из контактов. Сигнализация — световая, включающая зеленую лампу для минимальной температуры и — красную для максимальной. На рис. 359 дана монтажная схема пирометра *B*, работающего как терморегулятор электрической печи лабораторного типа. Эта установка состоит из пирометра *B*, электрической печи *F*, реле *A*, реостата $R_h$, амперметра $A_m$ и дополнительного трансформатора тока на 8 *в*. Принцип действия терморегулятора состоит в следующем: пусть задана максимальная критическая температура в 900° С. В момент достижения этой температуры указывающая стрелка прибора коснется контакта $B_2$, цепь замкнется, ток потечет в катушку реле *A*, последнее покачнется, ртуть выключателя разделится и ток в электрической печи прервется. По мере охлаждения печи температура спадает и, как только стрелка прибора оторвется от контакта $B_2$, реле снова включает ток электрической печи. Таким образом температурный режим печи остается почти постоянным. Как видно из рис. 359, эта монтажная схема допускает возможность лишь грубого регулирования температуры, т. е. либо полного включения, либо выключения тока. Однако, если вместо перерыва тока дать возможность реле включать дополнительное сопротивление реостата, тем самым сила тока попеременно будет иметь два значения, ограничивающие силу тока агрегата, благодаря чему регулирование температурного режима становится довольно точным. *В такой конструкции точность регулировки приборам Шевнара можно довести до 0,1° С.* При

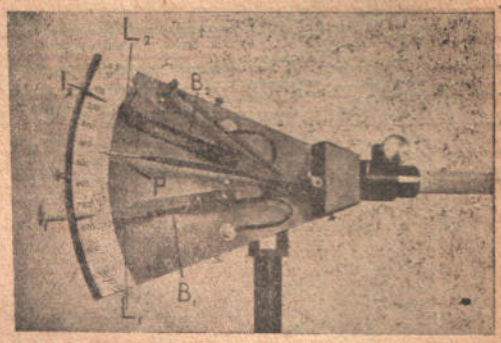



Рис. 358. Пирометр Шевнара с сигнализацией и терморегулированием, той же фирмы.

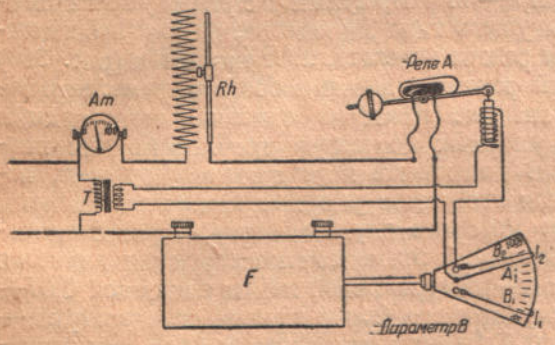



Рис. 359. Монтажная схема пирометра Шевнара для регулирования температуры электрической лабораторной печи сопротивления (полное включение или полное выключение).

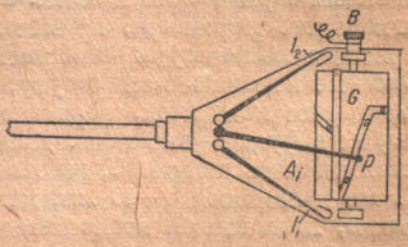



Рис. 360. Самопишущий сигнальный пирометр — терморегулятор с репродукцией термического цикла проф. Шевнара той же фирмы.

ограничении силы прерываемого тока обеспечивается хороший контакт между стрелкой прибора и серебряными контактами. Сигнальную лампу, питаемую 110 *в*, можно выключать непосредственно; лампа потребляет, примерно 0,2 *а*. При пользовании пирометром, как терморегулятором, реле включается в источник низкого напряжения, например, 6-вольтовый аккумулятор или 8-вольтовый трансформатор. Реле типа *A* применяется для печей как постоянного, так и переменного однофазного тока, а при помощи дополнительного замыкателя — также и для печей трехфазного тока. Реле работает на низковольтном токе и потребляет около 0,4 *а*. Ртутные выключатели допускают максимальную силу тока в 15 *а* при напряжении 220 *в*. Если снабдить пирометр дополнительным замыкателем, работающим от часового механизма, то получается возможность

пустить в ход или выключать печь в определенное заранее фиксированное время, чем достигается полная автоматизация термических процессов.

*Самопишущий сигнальный пирометр-терморегулятор.* По своей конструкции этот пирометр отличается от предыдущего наличием в нем механизма для регистрации температуры. Этот механизм состоит из латунного барабана, насаженного на ось часового механизма и приводящегося в движение последним. На этот барабан надевается диаграммная бумага, по которой движется перо, насаженное на конец стрелки. Эту конструкцию, сейчас несколько устарелую, легко модернизировать, заменив барабан с круглым часовым механизмом прямоугольным часовым и движущим механизмом типа немецкой фирмы «Байерле» для записи кривых в прямоугольных координатах. На барабане выгравированы ряд линий и делений, соответствующих градусам Цельсия и времени в часовом исчислении.

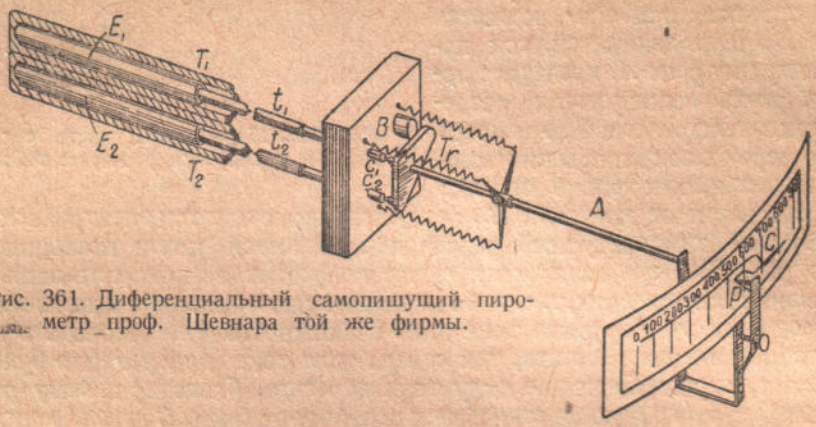



Рис. 361. Диференциальный самопишущий пирометр проф. Шевнара той же фирмы.

*Самопишущий сигнальный пирометр — терморегулятор с репродукцией термического цикла.* В отличие от предыдущего типа пирометра, дающего возможность стабилизировать температурный режим агрегата, этот пирометр (рис. 360) имеет целью изменить температурный режим агрегата в соответствии с заранее заданным термическим циклом. Как мы уже знаем из описания конструкции сигнального пирометра, применение упорных контактов необходимо для поддержания температуры стабильной. В данной же конструкции, наоборот, необходимо изменять температуру, а для этой цели упорные контакты заменены подвижным контактом, передвижение которого служит для изменения температуры в функции времени. Дополнительным элементом конструкции является металлический габарит *G*, изготовленный из серебряной ленты толщиной 0,07—0,1 *мм* и шириной 8—10 *мм*, которому придана форма кривой «температура — время», подлежащей воспроизведению. Габарит прикреплен к барабану пишущего механизма, с которым он находится также в электрическом контакте. Пишущий механизм заизолирован от остальных элементов прибора. Для включения габарита в цепь реле служит зажим *B*, связанный с часовым механизмом. Для записи кривой стрелка с пером заменена стрелкой *A* с серебряным штифтом *P*, обеспечивающим надежный контакт с габаритом. Перед пуском агрегата штифт *P* устанавливают на температуру окружающей среды. После предварительного определения необходимой для термической обработки силы тока пускают в ход часовой механизм с барабаном. Вначале контакт между штифтом и габаритом вызывает разрыв тока из-за вибрации реле. Продолжающееся вращение барабана прерывает этот контакт, электрическая цепь замыкается, печь или другой агрегат нагревается и в результате стрелка $A_1$ отклоняется. Как только снова устанавливается контакт между штифтом и габаритом, ток снова прерывается и т. д. Таким образом стрелка все время движется по габариту и температура печи следует по заранее заданному циклу. Совершенно излишне следить во время процесса за термическим режимом печи, ибо принятая в начале работы сила тока остается без изменений на время всей операции. Требуется лишь, чтобы эта сила тока

была достаточной для достижения максимальной температуры цикла. Однако, в целях уменьшения амплитуды начальных температурных колебаний, целесообразно ограничить силу тока минимальной величиной, совершенно необходимой для нормальной бесперебойной работы терморегулятора.

*Диференциальный самопишущий пирометр.* Конструкция этого пирометра, схема которого показана на рис. 361, заключается в следующем: параллельно трубке с эталоном «пирос», устанавливается дополнительная кварцевая трубка $T_2$, в которую помещается второй стержень, изготовленный из сплава или стали, подлежащей испытанию. Расширение или сжатие обоих металлов передается кварцевыми стержнями $t_1$ и $t_2$ рычажным механизмам амплификатора $T_r$, насаженного на ось $A$. Три конца треножника амплификатора описывают прямоугольный треугольник, причем острие, которому передается расширение эталонного стержня, занимает вершину этого треугольника. На другой конец оси $A$ насажена фасонная стрелка с пером, пишущим диференциальную кривую температуры. Из сказанного следует, что этот пирометр является, собственно говоря, диференциальным дилятометром. Рекомендуется избегать быстрого нагрева печи, так как в противном случае погрешности при перегреве, вследствие термической аномалии, могут исказить момент окончания превращения $A_c$. Для замедления процесса нагрева целесообразно использовать толстостенные муфели из неокисляющегося хромового сплава или высокоогнеупорного керамического материала. Тем не менее даже в случае быстрого повышения температуры можно довольно точно проследить начало превращения $A_c$, так как вне пределов критических температур средние величины теплоемкостей как сталей, так и сплава «пирос» мало разнятся друг от друга. Сказанное в равной мере относится и к началу второго превращения $A_r$. Таким образом показания диференциального пирометра являются решающими для суждения о термических свойствах данного сплава, т. е. иными словами, дают возможность произвести ориентировочный термический анализ сплава. Диференциальный пирометр пишет кривую температур не только по существующей шкале, но даже с учетом критических температур превращений испытываемых сплавов, в результате чего процесс термической обработки металлов производится с максимальной надежностью, так как температура закалки и отпуска стали находятся в точной зависимости от критических точек превращения стали. Диференциальный пирометр является на производстве хорошим помощником, так как дает возможность определить сплав по его критическим точкам, проверить способность закалки специальных сплавов и пр. В заключение необходимо отметить, что пирометры расширения проф. Шевнара нашли большое применение преимущественно в металлургической и машиностроительной промышленности, где они себя хорошо зарекомендовали, как точные, несложные и надежные приборы. Казалось бы, что конструкция, существенными деталями которой являются трубка и стержень из плавленного кварца, отнюдь не может претендовать на значительную прочность и тем более на надежность в работе. Однако, при тщательном изучении многих весьма ценных свойств кварца предубеждение против него отпадает. По сравнению с металлами кварц обладает следующими несомненными преимуществами.

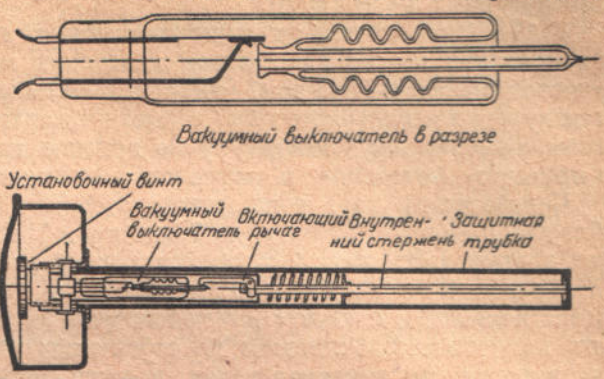



Рис. 361a. Дилятометрический пирометр с вакуумным выключателем, фир. Сименс и Гальске.

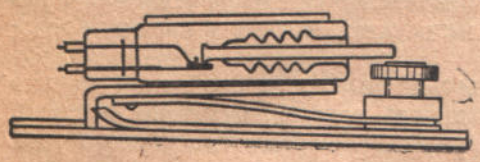


Рис. 361b. Поверхностный дилятометрический пирометр, фирмы Сименс и Гальске.

1. Крайне низким коэфициентом линейного расширения.
2. Низкой теплопроводностью.
3. Твердостью при высоких температурах.

Вследствие указанных свойств кварцевые детали пирометра Шевнара отличаются большой механической прочностью и весьма устойчивы к резким температурным колебаниям.

**§ 124. Оптические и радиационные пирометры.** Измерить температуру раскаленных тел можно посредством измерения интенсивности излучаемой телом лучистой энергии. Приборы, измеряющие температуру по тепловому эффекту от излучения накаленного тела, называются радиационными пирометрами. Пирометры, измеряющие температуру по яркости накаленного тела и построенные по принципу фотометра, называются оптическими пирометрами (ОСТ 7820).

Человеческий глаз чувствителен только в весьма узкой области спектра (область, примерно, от 0,365 до 7,3 микрона). Оптическая пирометрия использует только часть видимого спектра, чаще всего красную область.

В дальнейшем мы будем иметь дело только с термическим лучеиспусканием, удовлетворяющим следующему положению: энергия, излучаемая телом, должна быть полностью заимствована из собственного теплового запаса тела, а лучистая энергия, поглощенная телом, должна полностью превратиться в теплоту.

Законы термического лучеиспускания — зависимость между интенсивностью лучеиспускания, температурой и длиной волны излучения — установлены совершенно точно для абсолютного черного тела. Абсолютно черным телом называется тело, поглощающее все падающие на него лучи. На практике такое тело осуществляется в виде оболочки с непрозрачными стенками и с небольшим отверстием в стенке. Стенки оболочки должны находиться при одинаковой температуре.

Пучек лучистой энергии, проникающий через отверстие внутрь оболочки, испытывает на внутренней поверхности оболочки очень большое число отражений. Каждое отражение сопровождается значительным поглощением. Через отверстие обратно может выйти лишь очень незначительная часть потока, первоначально вошедшего в оболочку.

Температура такого тела может быть весьма высока и оно может сильно излучать (но, конечно, все лучи, падающие внутрь полости, будут поглощены). Радиация, выходящая из отверстия, будет радиацией абсолютно черного тела при температуре $T$.

Нечерные тела имеют коэфициент абсорбции $A_{\lambda T}$ меньше единицы.

Если через $e_{\lambda T}d\lambda$ обозначить энергию испускаемую телом, нагретым до температуры $T$ от длины волны $\lambda$ до длины $\lambda + d\lambda$, а через $A_{\lambda T}$ коэфициент абсорбции, то

$$e_{\lambda T} = A_{\lambda T} \cdot E_{\lambda T}, \tag{1}$$

где $E_{\lambda T}d\lambda$ — энергия, испускаемая абсолютно черным телом в той же спектральной области и при той же температуре $T$ (закон Кирхгофа).

Вид функции $E_{\lambda T}$ установлен Планком в 1900 году. Для неполяризованного излучения

$$E_{\lambda T} = 2\,\frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}, \tag{2}$$

где $e$ — основание системы натуральных логарифмов, константы $c_1$ и $c_2$ связаны с универсальными постоянными — скоростью света $c$ в пустоте ($2{,}998 \cdot 10^{10}$ *см/сек*), $h$-квантовой постоянной Планка и постоянной Больцмана $k$ $\left(1{,}372 \cdot 10^{-16}\,\frac{эрг}{град}\right)$ — следующими соотношениями

$$c_1 = c^2 h; \quad c_2 = \frac{h}{k} \cdot c.$$

Величина $c_2$ принимается в настоящее время равной 1,432 *см·град*.

Из уравнения Планка вытекает, что интенсивность лучеиспускания для любой изотермы при $\lambda = 0$ и $\lambda = \infty$ равна нулю. Следовательно, должен быть максимум интенсивности для какой-то длины волны $\lambda_{max}$. Условие максимума $\left(\frac{dE_\lambda}{d\lambda}\right)_{\lambda=\lambda_m} = 0$ дает уравнение:

$$\lambda_m \cdot T = \frac{c_2}{4{,}965} = 0{,}288 \text{ см} \cdot \text{град} \text{ — закон смещения Вина.} \quad (3)$$

Закон Планка в области низких температур и малых длин волн (произведение $\lambda T$ мало), можно заменить законом лучеиспускания Вина (1896).

$$E_{\lambda T} = c_1 \cdot \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (4)$$

В видимой области, для температуры $T = 2900$ ошибка в вычислении интенсивности по формуле (4) меньше 1%. Следовательно при измерении температур меньших 3000° абс. и при работе в видимой области спектра можно пользоваться законом Вина и избежать, таким образом, сложных вычислений.

Лучеиспускательная способность нечерного тела на основании законов Кирхгофа и Вина будет равна

$$E'_{\lambda T} = A_{\lambda T} c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}. \quad (5)$$

Полное количество энергии $E_T$, испускаемое единицей поверхности абсолютно черного тела по всем направлениям, определяется законом Стефана-Больцмана

$$E_T = \sigma T^4. \quad (6)$$

Энергия, испускаемая абсолютно черным телом, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Величина постоянной $\sigma$ закона Стефана-Больцмана принимается в настоящее время равной $5{,}73 \cdot 10^{-12}$ *вт·см*$^{-2}$ *град*$^{-4}$. Международная шкала температур выше точки золота (1063°C = 1336° $K$) основывается на законе Вина.

Интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре $T_0 = 1336°$ $K$ (точка золота) обозначим соответственно через $E_{\lambda T_0}$ и $E_{\lambda T}$, тогда на основании закона Вина

$$E_{\lambda T_0} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_0}}$$

$$E_{\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}},$$

откуда,

$$\frac{E_{\lambda T_0}}{E_{\lambda T}} = e^{-\frac{c_2}{\lambda}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} \text{ или } \ln \frac{E_{\lambda T_0}}{E_{\lambda T}} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0},$$

откуда

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{E_{\lambda T_0}}{E_{\lambda T}}. \quad (7)$$

Измерив отношение интенсивностей монохроматического испускания длины волны $\lambda$ при температуре $T$ и $T_0 = 1336°$ $K$[1] мы сможем определить температуру $T$.

На практике приходится иметь дело с нечерными телами. В таком случае температура, измеренная оптически монохроматическим пирометром, будет ниже действительной.

Измеряется так называемая черная температура. Черной температурой $T_s$ источника называется температура черного тела, имеющего ту же интенсивность излучения, как и источник излучения. Связь между черной и истинной температурой источника получить легко

$$E'_{\lambda T} = A_{\lambda T} c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}, \quad (8)$$

где $E'_{\lambda T}$ — интенсивность излучения данного тела при температуре $T$. Такой

[1] Точка 1336° К является точкой затвердевания золота (1063° С).

же интенсивностью излучения, на основании сказанного, должно обладать черное тело при температуре $T_s$.

$$E_{\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_s}} \tag{8'}$$

Так как в данном случае $E_{\lambda T} = E_{\lambda T_1}$, то $A_{\lambda T} \cdot c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_s}}$,

откуда получаем

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_s} + \frac{\lambda}{c_2} \ln A_{\lambda T}. \tag{9}$$

Величина коэфициента абсорбции $A_{\lambda T}$ зависит как от температуры тела, так и от длины волны. Если коэфициент абсорбции тела есть величина постоянная, не зависящая от длины волны, то такое тело называется серым. Серое тело имеет кривую распределения энергии в спектре идентичную с кривой черного тела при той же температуре. (Только интенсивность излучения уменьшена по сравнению с черным телом в однаковой степени для всех волн).

Температуру накаленного тела можно определить не только измерением интенсивности монохроматического испускания, но и на основании спектрального состава излучения, характеризующего *цвет* тела. Цветовой температурой $T_c$ источника радиации называется температура черного тела, имеющего то же спектральное распределение энергии, как и данный источник (тот же цвет).

Соотношение между цветовой температурой $T_c$ тела и истинной $T$ легко установить, а именно, на основании закона Вина

$$E'_{\lambda_1 T} = A_{\lambda_1 T} c_1 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_1 T}}.$$

На основании определения $E_{\lambda_1 T} = pE_{\lambda_1 T_c}$, где $E_{\lambda_1 T}$ энергия абсолютно черного тела при температуре $T_c$, а $p$ — множитель пропорциональности, не зависящий от длины волны. Следовательно,

$$A_{\lambda_1 T} c_1 \cdot \lambda_1^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_1 T}} = pc_1 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_1 T_c}}.$$

Для другой длины волны $\lambda_2$:

$$A_{\lambda_2 T} c_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_2 T}} = pc_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_2 T_c}}.$$

Деля одно уравнение на другое и логарифмируя, получим

$$\frac{1}{T_c} = \frac{1}{T} = \frac{\ln \frac{A_{\lambda_1 T}}{A_{\lambda_2 T}}}{c_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}. \tag{10}$$

Для металлов коэфициенты поглощения $A_{\lambda_1 T}$ (а следовательно и коэфициенты испускания $\varepsilon_{\lambda_1 T}$) уменьшаются по мере увеличения длины $\lambda$. Если $\lambda_2 > \lambda_1$, то $\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} > 0$ и $\ln \frac{A_{\lambda_1 T}}{A_{\lambda_2 T}}$. Следовательно, $\frac{1}{T_c} < \frac{1}{T}$ и $T_c > T$.

Для металлов цветовая температура $T_c$ выше истинной температуры $T$. Если $A_{\lambda_1 T} = A_{\lambda_2 T}$, иначе говоря коэфициент абсорбции (а следовательно и испускания, не зависит от длины волны, то $\ln \frac{A_{\lambda_1 T}}{A_{\lambda_2 T}} = \ln 1 = 0$ и $T_c = T$, т. е. цветовая температура серого излучателя равна его истинной температуре.

Измерения цветовой температуры весьма ценны для промышленности, так как такие излучатели как чугун, сталь, шлаки, огнеупоры, кокс суть серые излучатели, для которых цветовая температура равна истинной.

Но и для несерых излучателей цветовая температура ближе к истинной, чем черная.

Цветовую температуру излучателя можно определить при помощи монохроматического оптического пирометра с двумя фильтрами, пропускающими эффективную длину волны $\lambda_1$ и $\lambda_2$. Тогда:

$$E'_{\lambda_1 S_1} = c_1 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_1 T_{S_1}}} = c \lambda_1^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_1 T_c}};$$

$$E'_{\lambda_2 S_2} = c_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_2 T_{S_2}}} = c_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_2 T_c}}.$$

Деля одно уравнение на другое и логарифмируя, получим формулу:

$$T_c = \frac{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}}{\frac{1}{\lambda_1 T_{S_1}} - \frac{1}{\lambda_2 T_{S_2}}}, \qquad (11)$$

дающую зависимость между черной температурой $T_{S1}$ и $T_{S2}$ тела для двух длин волн $\lambda_1$ и $\lambda_2$ и цветовой $T_c$.

Энергию полного излучения нечерного тела можно часто представить в виде

$$E'_T = \sigma_1 T^4,$$

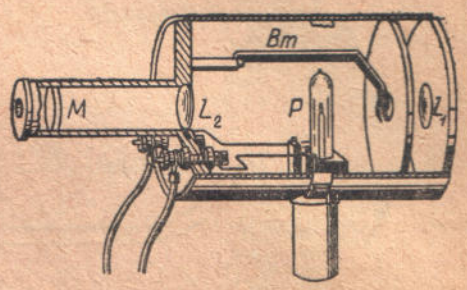



Рис. 362. Радиационный пирометр «Пиррадио», фирмы «Гартман-Браун».

где $\sigma_1$ — коэфициент, зависящий от природы излучателя. Радиационный пирометр, проградуированный перед абсолютно черным телом, покажет значительно низшую температуру $T_г$, соответствующую температуре абсолютно черного тела, испускающего тот же поток энергии. Следовательно,

$$\sigma_1 T^4 = \sigma T_г^4,$$

откуда получаем

$$T = T_г \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_1}}. \qquad (12)$$

*Пирометры полного излучения* (*радиационные*). Полная мощность излучения раскаленного тела посредством оптической системы используется для нагревания рабочего конца термопары и термоэлектродвижущая сила последней измеряется высоко чувствительным милливольтметром. Хотя показания таких приборов принципиально не зависят от расстояния излучателя от объектива, тем не менее, в виду несовершенства оптической системы, с увеличением расстояния между излучателем и объективом, замечаются порой довольно значительные погрешности в показаниях пирометра. Из наиболее распространенных конструкций радиационных пирометров считаем необходимым остановиться на нижеследующих:

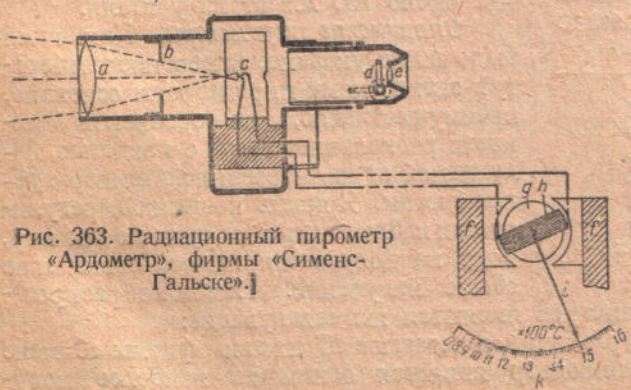



Рис. 363. Радиационный пирометр «Ардометр», фирмы «Сименс-Гальске».

Ардометр [1] — германской фирмы «Сименс и Гальске» (рис. 363). Излучение раскаленного тела концентрируется объективом *a* на рабочий конец термопары *c*. Последняя изготовлена из крестообразно расположенных нихромовой и константановой проволок, диаметром 0,03 *мм*, в месте пересечения которых припаян кружочек зачерненной платиновой фольги толщиною 0,007 *мм* и диа-

[1] Радиационные пирометры типа ардометра выпускаются в СССР заводом «Пирометр».

метром 2—3 *мм*. Термопара помещена в стеклянную грушу, наполненную аргоном. Развиваемая термопарой термоэлектродвижущая сила измеряется отдельным милливольтметром, градуированным в °С. Установка ардометра на раскаленное тело производится посредством окуляра *e*, устанавливаемого каждым наблюдателем применительно к индивидуальным особенностям своего зрения. Для предохранения зрения от ослепления при высоких температурах перед окуляром можно включить либо красное, либо дымчатое стекло *d*. Искажение показания ардометра может иметь место: 1) если действительное изображение излучателя не перекрывает полностью платинового кружка термопары: 2) при

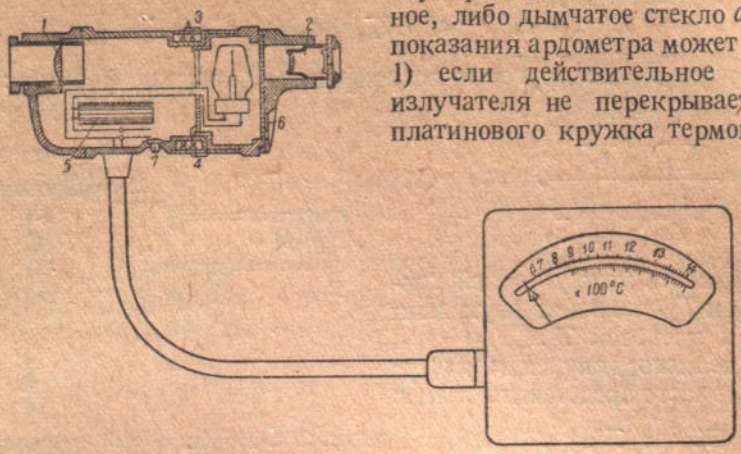



Рис. 364. Оптический пирометр Гольборн - Кульбаума новейшей конструкции, фирмы «Сименс-Гальске».

неправильной установке ардометра. Если действительное изображение излучателя не перекрывает платинового кружка термопары, то это означает, что измеряемый объект слишком мал, поэтому необходимо производить измерение с более близкого расстояния. Фирма «Сименс и Гальске» при установках ардометров рекомендует пользоваться данными нижепомещаемой таблицы, указывающей необходимые минимальные диаметры излучателя в зависимости от расстояния между объективом и излучателем.

Таблица 23

| Расстояние объектива ардометра (*мм*) от визируемого тела | Минимальный диаметр визируемого тела в пределах измерения | |
|---|---|---|
| | до 1 600 °С (*мм*) | свыше 1 600 °С (*мм*) |
| 300 | 37 | 37 |
| 500 | 40 | 40 |
| 700 | 44 | 44 |
| 1 000 | 53 | 48 |
| 1 500 | 82 | 62 |
| 2 000 | 110 | 83 |
| *x* | 1/18 *x* | 1/23 *x* |

При фабричной градуировке объектив устанавливается на среднее расстояние около 700 *мм* от излучателя.

*Оптические пирометры.* Как нами было выше указано, измерение температур оптическими пирометрами основано, преимущественно, на сравнении яркости раскаленного тела с яркостью, получаемой от калиброванной температурной лампы. Яркость последней регулируется наблюдателем от руки до тех пор, пока не получается полное совпадение обоих излучений. Наиболее распространенными из оптических пирометров являются нижеследующие:

1) Пирометр Гольборна-Курльбаума с исчезающей нитью фирмы «Сименс и Гальске» (рис. 364). Этот пирометр является одним из наиболее популярных оптических пирометров. Конструкция его заключается в следующем: в телескопе помещен объектив *a*, который переставляется до тех пор, пока изображение раскаленного тела совпадает с изображением нити температурной лампы. Потребляемый лампой ток измеряется амперметром, отградуированным в °С. Питание температурной лампы производится карманной батареей, которая помещается в корпус пирометра. Последовательно с лампой включено сопротивление *c*, при помощи которого регулируется накал лампы. При измерении более высоких температур (1200—2000), чтобы избежать перекала нити, фирма

«Сименс и Гальске» вместо этого ослабляет изучение раскаленного тела (обычно в несколько десятков раз) помощью дымчатого стекла, помещаемого между объективом и лампой. В этом случае отсчет производится по второй (нижней) шкале.

При измерении как высоких, так и низких температур накал нити изменяется в широких пределах. Между тем, глаз наиболее чувствителен при умеренных яркостях, а при чрезмерных — плохо оценивает небольшие разницы в яркости (эффект ослепления).

Поэтому, в новой конструкции пирометра Гольборна и Курльбаума между лампой и окуляром, кроме обычного красного светофильтра, введен круговой серый клин, посредством которого можно плавно изменять яркость изображения объекта и нити лампы, приводя ее в область наилучшей чувствительности глаза. Измерение температур пирометром Гольборна-Курльбаума производится следующим образом: окуляр устанавливается наблюдателем так, чтобы хорошо видеть очертания нити лампы. Затем, направляют телескоп на раскаленное тело и переставляют линзу объектива до тех пор, пока и визируемое тело не станет отчетливо видимым. В этот момент поворотом барабана реостата включается ток, причем вращение барабана производится до тех пор, пока яркость раскаленной нити пирометра не совпадает с яркостью измеряемого тела.

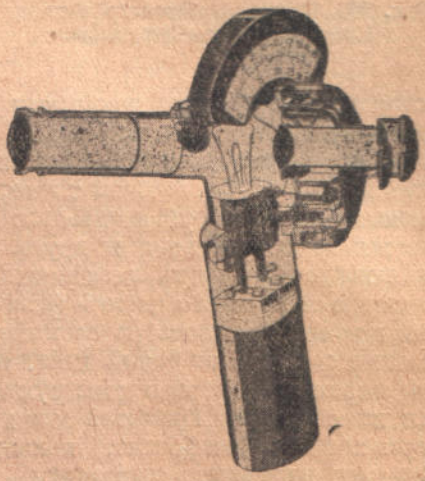


Рис. 365. Оптический пирометр «Пиропто», фирмы «Гартман-Браун».

2) Пирометр «Пиропто» фирмы «Гартман и Браун» (рис. 365). По оригинальности своей конструкции, а также электрической схемы включения этот пирометр выгодно отличается от других типов оптических пирометров. Все элементы пирометра «Пиропто», как то: телескоп, указывающий прибор, реостат, щелочной аккумулятор и пр. соединены в одно целое. Преимущество «Пиропто» заключается в том, что смена температурной лампы может быть произведена без новой градуировки пирометра. Пирометр «Пиропто» портативен, дает быстрые показания и особенно удобен для работы в тяжелых промышленных условиях.

*Цветовая пирометрия.* Инженером Незером сконструирован довольно простой и дешевый прибор, которым с успехом пользуются для измерения цветовых температур порядка 900—2000°. Действие цветного фильтра прибора Незера базируется на сравнении между собой двух монохроматических излучений. Это сравнение интенсивностей излучения возможно благодаря физиологическому свойству человеческого глаза, воспринимающего два одновременно падающие на одно место цвета, как третий смешанный цвет, отличный от обоих составляющих, при условии, если оба цвета по своему отдельному физиологическому действию равны. Если свет излучателя определенной температуры проходит через фильтр, пропускающий два далеко расположенные в спектре цвета с длинами волн $\lambda_1$ и $\lambda_2$, то в глазу получается смесь цветов, которая в зависимости от соотношения интенсивностей воспринимается либо как чистый цвет $\lambda_1$, либо как смешанный, либо как цвет $\lambda_2$. Поэтому для измерения изменяющихся температур необходим сложный фильтр, который в различных своих точках давал бы различное отношение поглощений этих двух цветов.

Этого можно достигнуть комплектом трех фильтров: 1 — должен везде пропускать оба цвета и задерживать все промежуточные, 2 — представлять клин, пропускающий, например, зеленый цвет, но поглощающий с возрастанием толщины все более красный цвет, а 3 — такой же клин свободно пропускающий красный свет, но все более поглощающий зеленый.

Если сложить все три фильтра вместе, то, очевидно, спектральный состав пропускаемого им цвета будет непрерывно изменяться от одного конца к противоположному.

Источник света, рассматриваемый через один конец, будет казаться зеленым, а через другой — красным, и где-то между ними будет наблюдаться смешанный цвет, т. е. для красного и зеленого — белый, в действительности кажущийся желтовато-серым.

С изменением температуры излучателя будет изменяться и спектральный состав излучения, а следовательно, будет смещаться и точка, где наблюдается смешанный цвет.

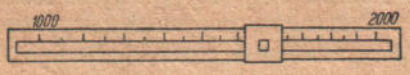



Рис. 366. Цветовой пирометр системы Нэзера, фирмы «Штрэлейн».

С повышением температуры возрастает количество зеленых лучей по отношению к красным и смешанный цвет перемещается к концу, легче пропускающему красные лучи и ослабляющему зеленые.

Таким образом, измерение пирометром цветовой температуры сводится к установлению точки появления смешанного цвета. Достигаемая цветовыми пирометрами точность измерения зависит от следующих моментов: 1) от величины перемещения места смешанного цвета при изменении температуры излучателя; 2) от субъективной точности установки пирометра. Перемещение места смешанного цвета увеличивается постольку, поскольку длины волн в спектре находятся дальше друг от друга. На точность установки влияет также умение наблюдателя отличить смешанный цвет от составляющих, способность к запоминанию смешанного цвета и физические недостатки зрения. Поэтому в конструкции цветового пирометра составляющими цветами выбраны красный и зеленый, дающие смешанный белый цвет, резко отличающийся от составляющих. Цветовой пирометр Незера в конструктивном оформлении фирмы «Штрэлейн» показан на рис. 366. Цветовой клин укреплен в деревянной рамке, по которой перемещается диафрагма, похожая на движок логарифмической линейки. Визируя излучатель через эту диафрагму, можно с достаточной точностью устанавливать смешанный цвет. Для достижения удовлетворительной точности измерения необходимо, чтобы наблюдатель не переутомлял своего зрения, для чего рекомендуется устанавливать цвет сначала приблизительно одним глазом, затем уже точно другим глазом. Достигаемая цветовым пирометром Незера точность измерения в пределах 900—2000° составляет около ±13°C.

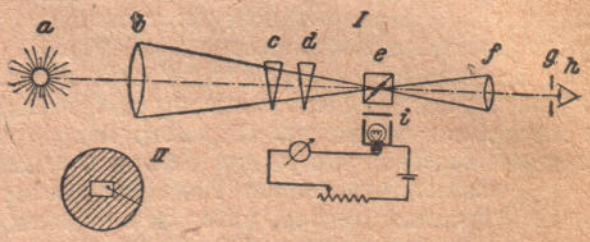



Рис. 367. Комбинированный цветовой пирометр «Биоптикс» Г. Незера

*Комбинированный цветовой пирометр с температурной лампой «Биоптикс» Г. Незера.* Принцип действия нового цветового пирометра Незера основан на нижеследующем: свет от исследуемого излучателя *a* попадает в глаз наблюдателя *h* через телескоп с объективом *b*, окуляром *f* и диафрагмой *g*.

На пути лучей помещен бихроматический цветовой клин *e*, пропускающий лишь красный и зеленый цвета. При перемещении клина меняется соотношение яркостей обоих цветов, так как с увеличением толщины клина, последний поглощает оба цвета с различной степенью интенсивности. Нейтральный клин *d* служит для изменения суммарной яркости цветов красного и зеленого, *e* — часть стеклянного кубика, которая замазана и посеребрена по диагонали и служит для установления оптического контакта между главным лучом и светом температурной лампы.

До начала измерения ток, питающий лампу, устанавливается на определенное стабильное напряжение. Перед лампой помещен бихроматический плоский светофильтр, пропускающий те же красный и зеленый цвета. Соотношение обоих цветов таково, что они сливаются в определенный белый цвет.

[1] Точность цветового пирометра в действительности гораздо ниже порядка ±30—40°, как среднее из ряда определений.

Пользование пирометром производится в следующей последовательности: после отрегулирования тока, питающего лампу, лупу и телескоп устанавливают на визируемый объект и клинья $c$ и $d$ вдвигают настолько, чтобы цвет и яркость исследуемого объекта совпал с яркостью температурной лампы, в результате чего демаркационная черта исчезает.

Отсчет цветовой температуры производится на цветном клину $c$, отсчет «черной» температуры в красном и зеленом цветах производится на сером клине $d$.

Новый пирометр Незера по точности приближается к термоэлектрическому. При сравнительных измерениях температуры расплавленных черных металлов в доменных и мартеновских печах, в вагранках и электропечах термоэлектрическими пирометрами «Биоптиксом» и пирометрами частичного излучения, «Биоптикс» давал расхождения в показаниях с термоэлектрическими всего в $\pm 15°$ С, в то время как погрешность в показаниях пирометров частичного излучения доходила до 250° С при температуре в 1580° С, т е. около 15%.

**§ 125. Погрешности при измерении температуры радиационными и оптическими пирометрами.** Оптические пирометры градуируются по температуре абсолютно черного тела. Но так как на практике приходится иметь дело не с абсолютно черным телом, а с отражающим более или менее значительную часть падающих на него лучей, то и измеренная их температура оказывается ниже действительной и требует внесения поправок на неполноту излучения. Если обозначить через $T_2$ абсолютную температуру тела, через $E_\lambda$ испускательную его способность при длине волны $\lambda$, то истинная абсолютная температура фотометрируемого тела при $\lambda = 0{,}65\ \mu$ по уравнению Вина равна:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda \log E_\lambda}{c_2 \cdot \log e} = \frac{0{,}65 \log E_\lambda}{14\,320 \cdot \log 2{,}718} = \frac{\log E_\lambda}{9560}.$$

В нижепомещенной таблице даны значения коэфициента $e_\lambda$ для некоторых тел.

Таблица 24

**Таблица коэфициента лучеиспускания для длины волны $\lambda = 0{,}65\ \mu$**

| Тело | Температура °С | 0,65 | Тело | Температура °С | 0,65 |
|---|---|---|---|---|---|
| Серебро | — | 0,07 | Окисленное твердое железо | 1 200 | 0,92 |
| Золото твердое | — | 0,13 | Окисленная специальная сталь | 800—1 100 | 0,8 |
| Золото жидкое | — | 0,22 | Углеродистая неокисленная сталь в водороде | 800—1 100 | 0,435 |
| Медь жидкая и неокисленная | — | 0,15 | Жидкий чугун: | | |
| Медь твердая окисленная | — | 0,70 | светлые пятна (окислы и шлаки) | 1 100—1 300 | 0,7—0,95 |
| Платина твердая | — | 0,33 | темные места (чистое зеркало) | выше 1 375 | 0,4 |
| Платина жидкая | — | 0,38 | Жидкая окисленная нержавеющая хромистая и хромоникелевая сталь | — | 0,75—0,9 |
| Никель твердый и жидкий неокисленный | — | 0,36 | Жидкие шлаки | 1 300—1 500 | 0,65—0,95 |
| Окисленный никель | 800 | 0,96 | Свинцовая ванна: | | |
| Окисленный никель | 1 300 | 0,85 | шлаки | 900 | 0,95 |
| Окисленный нихром | 600 | 0,95 | чистое зеркало свинца | — | 0,5—0,6 |
| Окисленный нихром | 900 | 0,90 | Соляная ванна | 700—1 400 | 0,8 |
| Окисленный нихром | 1 200 | 0,80 | Графит в порошке | — | 0,95 |
| Тантал неокисленный | 1 100 | 0,60 | Уголь | — | 0,85 |
| Тантал неокисленный | 2 600 | 0,48 | Окись алюминия—гладко прессованный порошок | — | 0,14 |
| Вольфрам неокисленный | 1 000 | 0,46 | Окись хрома—гладко прессованный порошок | 700—1 300 | 0,85 |
| Вольфрам неокисленный | 2 000 | 0,43 | Карборунд | — | 0,8 |
| Вольфрам неокисленный | 3 000 | 0,41 | Шамот | — | 0,7—0,8 |
| Железо жидкое неокисленное | — | 0,37—0,4 | Фарфор | — | 0,25—0,5 |
| Железо твердое неокисленное | — | 0,37 | | | |
| Железо твердое неокисленное | 1 300—1 500 | 0,45 | | | |
| Окисленное твердое железо | 800 | 0,98 | | | |
| Окисленное твердое железо | 1 000 | 0,95 | | | |

Как видно из таблицы, поверхности чистых металлов обладают низкой лучеиспускательной способностью, в то время как окисленные черные металлы имеют коэфициент лучеиспускания равный 0,4 — 0,98. Ниже помещаем таблицу поправок на неполноту излучения. Эти поправки необходимо прибавить к показаниям оптического пирометра для вычисления истинной температуры.

Таблица 25

**Поправки на неполноту излучения**

Поправки вычислены для $c_2 = 14350\,\mu\,°C$; $\lambda = 0{,}65\,\mu$

| Испускательная способность | Поправки | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 700 | 800 | 900 | 1 000 | 1 100 | 1 200 | 1 300 | 1 400 | 1 600 | 1 800 | 2 000 |
| 0,30 | 55 | 67 | 80 | 95 | 111 | 129 | 148 | 168 | 213 | 264 | 322 |
| 0,40 | 41 | 50 | 60 | 71 | 83 | 96 | 110 | 125 | 158 | 195 | 237 |
| 0,50 | 31 | 37 | 45 | 53 | 62 | 71 | 82 | 93 | 117 | 144 | 175 |
| 0,60 | 22 | 27 | 33 | 39 | 45 | 52 | 59 | 67 | 85 | 104 | 126 |
| 0,70 | 16 | 19 | 23 | 27 | 31 | 36 | 41 | 47 | 59 | 72 | 87 |
| 0,80 | 10 | 12 | 14 | 17 | 19 | 22 | 25 | 29 | 36 | 44 | 54 |
| 0,90 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 14 | 17 | 21 | 25 |
| 1,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Наличие над измеряемой поверхностью густого дыма, поглощающего большую часть излучения, может вызвать погрешность в показаниях, особенно значительную для радиационных пирометров, доходящую до нескольких сотен градусов. Запыление и загрязнение оптики настолько повышает поглощение в оптической системе, что погрешности при этом достигают иногда крупных значений. Во избежание этого необходим тщательный уход за оптической системой прибора. Целесообразнее же предохранить телескоп от загрязнений принятием надлежащих предохранительных мер против доступа пыли в прибор. Это достигается помещением прибора в закрытый футляр или на время (когда прибор не работает) объектив его прикрывают специальной крышкой. Поглощение лучей особенно значительно при наличии паров воды, $CO_2$ и CO, у которых имеются полосы поглощения около 6μ и 3μ. Измерение температуры через тонкое бесцветное стекло оказывает заметное влияние на показания оптического, а в особенности радиационного пирометра. По данным Американского Бюро Стандартов лучепоглощение $E_\lambda$ оконного стекла толщиной 2 *мм* составляет около 0,904. Ниже приводим таблицу поправок на поглощение промежуточным стеклом для оптического пирометра.

Таблица 26

**Поправки к показаниям оптического пирометра на лучепоглощение чистого стекла ($\lambda = 0{,}65$)**

| Наблюдаемая температура (°C) | Необходимые поправки (°C) | Наблюдаемая температура (°C) | Необходимые поправки (°C) |
|---|---|---|---|
| 600 | 3,5 | 1 600 | 16 |
| 800 | 5,4 | 1 800 | 20 |
| 1 000 | 8 | 2 000 | 24 |
| 1 200 | 10 | 2 500 | 36 |
| 1 400 | 13 | 3 000 | 50 |

Эти поправки необходимо прибавлять к показаниям оптических пирометров. Влияние же промежуточного стекла на погрешности в показаниях радиационных пирометров в зависимости от их конструкции довольно значительно. Так, погрешности в показаниях ардометра при измерении через стекло составляют: при 1100° около 30° С; 1300 — 35° С; 1500—45°; 2000—85°; 2500—85°. Для пирометра же Фери с позолоченным зеркалом при измерении через стекло толщиною 1 *мм* наблюдались следующие погрешности: при 900° около 160° С; 1 100—170°; 1300—175° и при 1500—180° С.

*Влияние размера фотометрируемого объекта и влияние ориентировки прибора.* Само собою понятно, что для точности показания радиационных пирометров необходимо, чтобы действительное изображение фотометрируемого объекта полностью перекрывало спай термопары, что при обычных размерах этого спая и фокусного расстояния объектов, имеет место лишь в том случае, когда диаметр объекта составляет от $^1/_{10}$ до $^1/_{20}$ расстояния между объектом и пирометром. Пирометры с исчезающей нитью обычно снабжаются сильно увеличивающей оптической системой, благодаря чему измерение температуры можно производить даже через очень небольшие отверстия с точностью до 20° С. Погрешности, обусловленные ориентировкой прибора, особенно значительны для радиационных пирометров, рабочий конец термопары которых не помещен в вакууме.

Так, при данном излучении температура, воспринимаемая рабочим концом, находится в сильной зависимости от конвекционных токов, имеющихся в газе, находящемся в колбочке с термопарой. Эти конвекционные токи сильно меняются в зависимости от положения прибора при измерении. Если прибор, отградуированный в вертикальном положении приемной плоскости, расположить при измерении так, что она станет горизонтальной, то это вызывает погрешность $\pm$ 20° С. Поэтому для устранения погрешности от ориентировки прибора многие фирмы, как например, «Сименс и Гальске» раньше применяли термопары, помещенные в вакуумные колбочки.

*Погрешности от нагревания пирометра.* Показания радиационных пирометров в зависимости от их конструкции зависят в различной степени от температуры окружающей среды. Так как по своему назначению эти приборы должны быть установлены вблизи агрегатов, то температура приборов достигает иногда 100 и более градусов. Необходимо пользоваться лишь такими пирометрами, которые соответствуют указанным производственным условиям, в противном случае срок службы их будет весьма непродолжительным. Во избежание погрешности, обусловленной нагреванием телескопа пирометра, фирма «Сименс и Гальске» применяет термоэлектродные провода, развивающие термоэлектродвижущие силы меньшего порядка, чем термопара. Более удачно эта проблема разрешена фирмой «Гартман и Браун», применяющей биметаллическую пластинку для компенсирования погрешности от нагревания телескопа, благодаря чему радиационным пирометром Гартман и Брауна (Пиррадио) можно пользоваться при температуре окружающей среды даже до 120° С. С 1932 г. фирма «Сименс и Гальске» выпускает ардометры с термопарами, помещенными в колбочки с аргоном, вследствие чего при повышении температуры ардометра на 100° погрешность составляет не более 1,5% показания, причем поправка не превышает $\pm$10° С.

**§ 126. Преимущества и недостатки оптических и радиационных пирометров.** Оптические пирометры по сравнению с радиационными отличаются гораздо большей точностью показаний. Особенно сильное влияние на показания радиационных пирометров типа Фери оказывают холодные газы $CO_2$, CO и пары воды, находящиеся между измеряемым объектом и пирометром. Эти газы поглощают инфракрасные лучи и тем снижают показания отражательных радиационных пирометров. Применение в современных конструкциях радиационных пирометров (пиррадио, ардометр, пиро и др.) стеклянных объективов устраняет этот недостаток, так как поглощение газами инфракрасных лучей несущественно для пирометров со стеклянными объективами, ибо эти лучи вовсе не доходят до горячего спая термопары. Преимущества радиационных пирометров по сравнению с оптическими заключаются в возможности автоматической регистрации их показаний, применения сигнальных и автоматически регулирующих устройств. Недостатками радиационных пирометров являются: большая погрешность в показаниях от неполноты излучения, от нагревания телескопа, а также отчасти от расстояния между измеряемым объектом и пирометром. Вследствие нагревания различных частей телескопа под влиянием излучения измеряемого объекта наблюдается заметная тепловая инерция радиационных пирометров, поэтому показания максимальной температуры получаются лишь спустя некоторое время. Эта тепловая инерция прибора влечет за собой и явление гистерезиса, особенно характерного при заметных, резких колебаниях температуры измеряемого тела. Радиационные и оптические пирометры широко применяются в промышленности в тех случаях, когда применение термоэлектрических пирометров, ввиду специфичности условий данного производственного процесса, становится невозможным. Достижимая точность измерения составляет: оптическими пирометрами — при прецизионных работах — 0,5° при 1500° С, при промышленных измерениях $\pm$ 5—10° при 1500° С; радиационными пирометрами — $\pm$ 25—30° С при температурах порядка 1000—1200° С. При измерении оптическими пирометрами необходимо, чтобы световой поток, исходящий из какой-нибудь точки измеряемого тела, полностью покрывал объектив прибора, так как в противном случае возможны серьезные погрешности в показаниях прибора. По этим соображениям отверстия различных диафрагм должны быть рассчитаны таким обра-

зом, чтобы не задерживать лучей, исходящих из какой-нибудь точки центральной перегородки и направленных к любой точке объектива (виньетирование). То же в равной мере относится к оптическим пирометрам, снабженным отражательными призмами, находящимися между измеряемым телом и объективом. При особо точных измерениях необходимо, чтобы размеры фотометрируемого тела были достаточно велики. Так например, диаметр изображения должен быть в 3—4 раза больше диаметра нити лампы.

*Измерение температур фотоэлектрическим методом.* Этот новый метод измерения и автоматического регулирования высоких температур в США за последнее время все больше применяется. Проблема измерения температуры фотоэлементами получила удовлетворительное разрешение благодаря прогрессу техники изготовления тиратронных трубок, служащих для усиления фотоэлектрического тока. Измерение температур фотоэлектрическим методом базируется на следующем явлении: свет, концентрирующийся от раскаленного тела на фотоэлемент, выбивает в последнем электроны и, при наложении напряжения, в фотоэлементе возникает ток, пропорциональный по величине интенсивности радиации измеряемого объекта. Величина возникающего в фотоэлементе тока и служит для измерения температуры излучателя. Прежде чем перейти к описанию конструкции фотоэлектрических пирометров, коснемся вкратце конструкции применяемых для указанных пирометров электронных ламп и тиратронных трубок. Электронные лампы общеизвестны как применяемые в радиоприемниках. Двухэлектродная лампа употребляется как выпрямительная, трехэлектродная (с сеткой) — как усилительная.

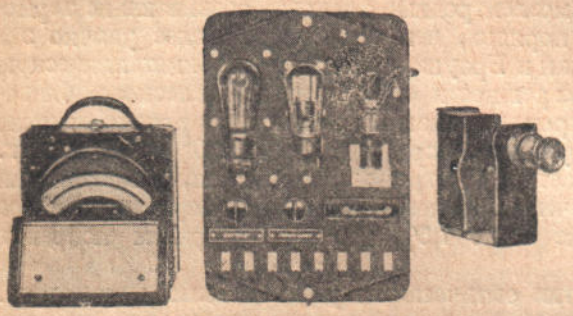


Рис. 368. Фотоэлектрический пирометр, фирмы «Дженерал-Электрик К°».

Как известно, данное на сетку положительное напряжение пропускает анодный ток, почти пропорциональный сеточному напряжению, если работать на прямолинейной части характеристики.

Если в усилительную лампу ввести очень немного ртутного пара, то характеристика лампы резко меняется. Регулируя сеточное напряжение, можно попрежнему запирать ток в лампе.

Но если, наложив напряжение на сетку, вызвать анодный ток в лампе, то, благодаря ионизации ртутного пара, этот ток быстро нарастает независимо от сеточного напряжения.

Наложив на сетку отрицательное напряжение, можно снова запереть ток. Таким образом, лампа обращается в мощное безинерционное реле.

Такая лампа называется тиратроном. Как реле, тиратрон дает хорошие результаты благодаря своей чувствительности и большой мощности на выходе по сравнению с электронной лампой. Для регулирования максимальной и минимальной температуры необходимы две тиратронных трубки.

Фотоэлектрический пирометр состоит из следующих деталей: вакуумного фотоэлемента, помещенного в специальный футляр, усилительной лампы и показывающего или самопишущего измерительного прибора. Дополнительными элементами пирометра является выпрямительная лампа, снабжающая прибор постоянным током и регулятор напряжения. Одна из американских конструкций фотоэлектрического пирометра показана на рис. 368. Фотоэлемент помещен в металлический футляр с отверстием для установки в фокус. Действие нового пирометра заключается в следующем. Излучение измеряемого объекта на фотоэлемент вызывает в последнем при температуре свыше 700° появление тока, который в усилительном контуре пропорционально увеличивается. Величина тока измеряется показывающим или самопишущим прибором, отградуированным в °С. При пользовании фотоэлектрическими пирометрами необходимо так же, как и при радиа-

ционных пирометрах, чтобы действительное изображение излучателя перекрывало «поле зрения» фотоэлемента, а также необходимо наличие достаточно интенсивной радиации. Так, например, при температурах в 1100° С и расстоянии в 0,9 *м* от элемента до измеряемого объекта, минимальная поверхность последнего, дающая необходимую интенсивность излучения, равна примерно — 12 *см*², Фотоэлектрический пирометр является температурным измерителем исключительно высокой чувствительности. Точность измерения, достигаемая пирометром, составляет ± 5° С. Одним из существенных преимуществ нового пирометра является быстрота возникающего эффекта. Фотоэлемент и усилительная лампа моментально реагирует на колебания температуры. Некоторая задержка в получении показаний происходит вследствие инерции измерительного прибора (показывающего или самопишущего). В отличие от радиационных и оптических пирометров, новый пирометр нет надобности устанавливать при каждом новом измерении. Пирометр при помощи одного или нескольких тиратронов можно приспособить для автоматического контроля температуры. Фотоэлемент и усилительную лампу можно отрегулировать таким образом, чтобы при определенной заранее заданной критической температуре ток из лампы переводился в тиратрон, который в свою очередь может управлять определенным контрольным механизмом. Вследствие некоторой своей громоздкости пирометр применяется преимущественно для стационарной работы. Особенный интерес пирометр представляет для металлургической промышленности, где он с успехом применяется при измерении температур прокатки труб, рельс, листов и т. п. Для измерения температур болванок, поступающих на прокатный стан, пирометр необходимо снабдить двумя тиратронными реле. Несмотря на кажущуюся хрупкость такого прибора, из-за наличия в нем маленьких стеклянных колб, этот пирометр вполне оправдал себя на производстве и все более применяется во многих отраслях промышленности США.

---

Гидро-Мелио-
Подавлячна Лабораторія
Сатинний Інститут

# XI. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВ ТЕПЛА

**§ 127. Определение количеств тепла из повышения температуры.** Количество тепла измеряют или по повышению температуры, которое это тепло сообщает некоторому телу — теплоносителю — или по понижению температуры, которое этот теплоноситель испытывает при отнятии тепла. Если теплоноситель с массой $m$ и удельной теплоемкостью $c$ нагревается от $t_1$ до $t_2$, то подведенное к нему количество тепла будет

$$Q = m \cdot c\ (t_2 - t_1) \tag{1}$$

и точно такое же количество тепла он отдает при охлаждении от $t_2$ до $t_1$.

Там, где определенный теплоноситель (который, смотря по обстоятельствам, может обозначаться и как носитель холода) многократно испытывает изменения температур, то в формуле (1) целесообразно объединить вместе $m$ и $c$ и подсчитать раз навсегда произведение $mc$, которое обозначается как теплоемкость или водяной эквивалент

$$m\ кг \cdot c\ \frac{ккал}{кг.\ град} = mc\ \frac{ккал}{град} \tag{2}$$

и при таком наименовании $mc$ будет приращением количества тепла теплоносителя, при повышении его температуры на 1°—его теплоемкостью. Так как такое приращение количества тепла различных теплоносителей бывает одинаковым тогда, когда эти произведения равны, то их можно сравнить с количеством воды $m_w$, удельная теплоемкость которой принимается равной 1 *ккал/кг · град* и тогда получается

$$m_w\ кг \cdot 1\ \frac{ккал}{кг.\ град} = m \cdot c\ \frac{ккал}{град}. \tag{3}$$

Выражение $m \cdot c$ наименованием *кг* означает количество воды, которое поглощает то же количество тепла, как и примененный при испытании теплоноситель. Это — так называемый *водный эквивалент.*

Удельная теплоемкость $c$ представляет собою специфическое свойство материала, величину которой можно получить из таблиц. Следует вводить *среднюю удельную теплоемкость* между температурами $t_1$ и $t_2$. Если удельная теплоемкость возрастает с повышением температуры, то опыт дает различные значения в зависимости от выбранного интервала; сужая интервалы, в конце концов приходим к *истинной удельной теплоемкости* при температуре $t_1$, которая соответствует приращению температуры на $dt$ и определяется как $c = dQ/dt$.

Из хода измерений истинной теплоемкости получается средняя теплоемкость $c_m$ между температурами $t_1$ и $t_2$.

$$c_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c_t \cdot dt, \tag{4}$$

которую можно определить графически построением соотношения между $c$ и $t$ и планиметрированием полученной площади; если зависимость теплоемкости

от температуры является линейной, то средняя теплоемкость равна истинной при средней температуре $\frac{1}{2}(t_1 + t_2)$.

Удельная теплоемкость, которая часто дается простым числом, имеет в технической системе мер наименование *ккал/град кг* или *ккал/град м*³ $\left(\frac{0}{760}\right)$.

Для вычислений часто удобно применять понятие *теплосодержания*. Это есть количество тепла, которое необходимо сообщить телу $m$ для нагревания его при постоянном давлении от начальной температуры 0° С до $t$° С. Так как при $t_1$ теплосодержание будет $m \cdot c \cdot t_1$, а при $t_2$—$mct_2$, то количество тепла, сообщенное телу при нагревании его от $t_1$ до $t_2$ равно разности теплосодержаний при обеих температурах. При отрицательных температурах получается также и отрицательные теплосодержания оттого, что произвольно принимают 0° С за начало температурной шкалы. Никаких затруднений при расчетах по теплосодержанию от этого не возникает, необходимо только обращать внимание на знак. При переменном $c$ теплосодержание получается, как указано выше, графически.

Если вместо массы $m$ вводится приведенный объем $V$, то удельную теплоемкость следует также относить к объему. Расчеты по приведенным объемам или по граммолекулам удобны для двухатомных газов, так как удельная теплоемкость, отнесенная к объему, одинакова для всех двухатомных газов.

**§ 128. Единица теплоты. Удельная теплоемкость воды.** Законом установленная единица для измерения количеств теплоты есть большая калория—*ккал* — и килоджоуль — *кдж*. Большая калория это такое количество теплоты, которое, при атмосферном давлении, повышает температуру 1 *кг* воды с 19,5 до 20,5°. Килоджоуль принимается равным 860 *ккал*. Таким образом, в основу положена так называемая 20° калория; так как она происходит из *CGS*-системы, то она относится прежде всего к грамму; для применения в технике удобнее величина в тысячу раз большая, называемая килокалорией (большой калорией). По ОСТ 6259 килокалория равна 4,182 килоджоуля. Средняя к. калория основана на удельной теплоемкости между 0 и 100°С. Поэтому *к. калория при нуле* почти на 1% больше. Истинная удельная теплоемкость воды, понятие которой определяется так, что одинаковому поглощению тепла отвечает одинаковое количество подведенной механической или электрической энергии, имеет, таким образом, при 0° С величину около 1,01, дальше она падает и при 20° С проходит через 1, затем при 30° С имеет минимум, чтобы опять подняться при 100° С до 1,004; выше 100° она все повышается и достигает при 300° почти 1,15.

Однако, в новых таблицах водяного пара этому изменению теплоемкости не придают значения, и при 100° С *теплосодержание* воды ставится численно равным температуре, следовательно, теплоемкость воды принимается равной единице. Это оправдывается простотой вычисления, а также тем, что постоянно наблюдаются известные отклонения между отдельными испытаниями. Поэтому следует производить калориметрический опыт при 20°.

Различные значения количества тепла получаются, когда работают при комнатной температуре с бунзеновским ледяным калориметром или с водяной баней в интервале температур до 100°. Поэтому данные в литературе и в таблицах часто приводятся, исходя из теплоемкости воды при различных температурах; после введения ОСТ'а количество теплоты должно исчисляться в 20° калорий.

В английской системе мер единица количества тепла (British Thermal Unit—BTU) представляет $^1/_{100}$ того количества тепла, которое необходимо для повышения температуры одного английского фунта воды от 32 F до 212 F. Одна BTU = = 0,252 *ккал*.

**§ 129. Производство измерений.** Можно производить измерение при неподвижном или только размешиваемом теплоносителе, который при этом нагревается или охлаждается; такие измерения обозначаются как испытания на нагревание или охлаждение. Но можно работать и при установившемся состоянии, причем тепло передается протекающему теплоносителю, для которого измеряется секундное протекшее количество воды и разница температур притекающей

и уходящей воды. Примером первого рода может служить калориметр с бомбой (§ 140), примером второго — калориметр Юнкерса (§ 142): по второму способу определяются потери газовой машины с выхлопными газами, если тепло последних непрерывно передается воде через трубчатую систему, вроде поверхностного конденсатора. Всякий поверхностный конденсатор паровой машины также в сущности является большим калориметром. Наконец, оба рода измерений могут применяться и при холодильных машинах.

Оба рода измерений требуют целого ряда поправок. В обоих случаях может оказывать влияние *теплообмен с окружающей* средой; должен ли такой теплообмен служить основанием для поправок, зависит от цели исследования. Если требуется испытать, может ли нагревательное устройство сообщить некоторому количеству жидкости определенное количество тепла в предписанное время, то поправки на потерю тепла не должны учитываться.

При испытаниях нагреванием и охлаждением стенка сосуда принимает участие в температурных изменениях, полностью или частично, и поглощение или отдача ею теплоты должны быть учтены как поправка. Поэтому вообще необходимо применять металлические стенки, так как они очень быстро воспринимают всякое изменение температуры. Иначе бывает при теплоизоляторах, при которых это изменение воспринимают только ближайшие слои, тогда как для слоев более отдаленных проходит много времени, пока они нагреются или охладятся.

Пример. На некоторой холодильной установке производится *испытание охлаждением*. В то время, как раствор не циркулировал, но только размешивался мешалкой, наблюдалось падение температуры. По установлении равномерного падения построением кривой температуры в функции времени была графически выделена часть кривой для исследования; для понижения температуры с — 2° С до—6° С потребовалось 61 *мин*; этому отвечает падение температуры в 3,93° С/*час*. Измерением выпарителя был определен объем рассола в 3,18 $м^3$ при—5°С; удельный вес раствора хлористого магния был измерен ареометром при + 20° С и оказался равным 0,91, что дает 1091 $кг/м^3$; таблицы Ландольта и Бернштейна (5 издание 1923 г., стр. 429) дают для этого содержание соли в растворе в 10,7%. Температурная разница между + 20° С и —5° С обусловливает (Ландольт и Бернштейн, стр. 429) разницу в удельном весе в 0,6% ($\gamma_{20} : \gamma_{-5} = 1{,}006$), откуда получается вес рассола $3{,}18 \cdot 1{,}006 \cdot 1091 = 3490$ *кг*. Удельная теплоемкость 10,7% раствора $MgCl_2$ равна 0,845 *ккал/кг* (Ландольт и Бернштейн, стр. 1262, по Коху). Кроме рассола также охлаждалась та часть железа резервуара, которая находилась ниже зеркала рассола, а также медный змеевик. По рабочим чертежам вес железных частей получается около 800 *кг*, медных частей 160 *кг*; удельную теплоемкость железа и меди принимаем в 0,114 и 0,093.

Водяной эквивалент охлажденных частей исчисляется (§ 127) так:

| | | |
|---|---|---|
| Рассол . . . . . | 3940 *кг* · 0,845= | 2948 *кг* |
| Железные части . . . . . | 800 *кг* · 0,114= | 91 *кг* |
| Медные части . . . . . | 160 *кг* · 0,093= | 15 *кг* |
| Общий водяной эквивалент охлажденных частей . . . . . | | 3054 *кг*. |

Части охлаждались на 3,93° С/*час*, таким образом мощность холодильной установки — $3054 \cdot 3{,}93 = 12\,000$ *ккал/час*.

Поправки, которые могли бы потребовать на изоляцию резервуара и разные другие части, не приняты во внимание, так как их трудно определить; во всяком случае мощность холодильной установки благодаря этому оценена несколько низко. Излучение оставлено без внимания, так как вопрос идет о наибольшей мощности, которую может дать установка и так как при практической эксплоатации установки излучение проявится в той же степени.

На другой холодильной установке было произведено *испытание при установившемся режиме*. Холодный рассол направлялся по своему назначению в охлаждаемое пространство; из него он возвращался несколько нагретым. Нагрузка установки, путем изменения числа оборотов, регулировалась так, чтобы как

раз покрывать потребность охлаждаемого пространства в холоде, так что отходящий рассол опять приводился к одной и той же низшей температуре; этим было достигнуто установившееся состояние холодильной установки. В течение трехчасового испытания рассол в среднем поступал в охлаждаемое пространство при — 7,21° С и возвращался при — 5,17° С; таким образом, он охлаждался на 2,04° С. Посредством диафрагмы (§ 73) возвращающееся количество было измерено и дало 5,19 *л/сек* или 18 680 *л/час*. Удельный вес раствора поваренной соли 1,132 при 20° С, содержание соли в растворе 18,2%, соответственно $\gamma = 1{,}151$ при — 5° С и соответствующая удельная теплоемкость 0,825 *ккал/кг* (Ландольт и Бернштейн, стр. 388; 428, 1260 по Греберу). Мощность холодильной установки $18\,680 \cdot 1{,}151 \cdot 0{,}825 \cdot 2{,}04 = 36\,200$ *ккал/час*. Необходимо внести еще поправку на недостаточно установившееся состояние; именно температура всего количества рассола в конце испытания оказалась на 0,2° С выше, чем вначале. Поправка должна быть вычислена как при испытании охлаждением; водяной эквивалент рассола, включая железные и медные части, был 8600 *кг*, поэтому им было отдано $8600 \cdot 0{,}2 = 1700$ *ккал* холода за три часа. Мощность холодильной установки поэтому была на $1700 : 3 = 570$ *ккал/час* меньше и составляла таким образом 35 630 *ккал/час*. Дальнейшие поправки в данном случае надо сделать на теплообмен с окружающей средой; именно в данном случае вопрос идет об испытании не всей установки, а нового компрессора, качество работы которого не может зависеть от плохой изоляции испарителя. После остановки компрессора и циркуляции рассола, в охлаждаемом пространстве оставляют в действии только мешалку, чтобы иметь равномерную температуру в испарителе, и наблюдают в течение 10 часов повышение температуры с —7,3 до — — 4,9° С, или на 0,24° С в час при средней температуре $-\frac{1}{2}(7{,}3 + 4{,}9) = -6{,}1$° С. Температура помещения около + 10° С, так что при — 7,21 °С следует рассчитывать на $0{,}24\,\frac{17{,}21}{16{,}1} = -0{,}26$° С теплоизлучения (*испытание на излучение*). При водяном эквиваленте 8600 *кг* поправка получается $8600 \cdot 0{,}26 = 2240$ *ккал/час* окончательная мощность будет $35\,630 + 2240 = 37\,870$ *ккал/час*.

Так как во время испытаний при установившемся режиме неточности вследствие влияния изоляции входят только в поправку, то такой способ следует предпочитать вообще, а не только при испытании холодильных установок. Там, где полученный холод не может быть использован в холодильнике, его приходится уничтожать посредством пара; если последний сконденсировать в змеевике, то по весу конденсата можно еще раз определить мощность холодильной установки (§ 135).

Для количества тепла, передаваемого *газовым потоком по круглой трубе*, имеет место следующее: температура уменьшается по направлению изнутри наружу и за среднюю температуру многие склонны считать значение

$$\frac{2\pi}{R^2\pi}\int_0^R t \cdot r \cdot dr;$$

исчисленное по ней и по количеству газа количество тепла не составляет, однако, действительно перенесенное газовым потоком количество тепла, так как распределение скоростей подчиняется другому закону, чем распределение температур. Поэтому приходится суммировать значения количеств тепла отдельных концентрических слоев или, что означает то же самое, выводить среднюю температуру, как

$$\frac{\int_0^R t \cdot v \cdot r \cdot dr}{\int_0^R v \cdot r \cdot dr}.$$

При наличии завихрений определенная таким образом средняя температура

имеет место, согласно Шаку (Л.) на расстоянии $r = 0{,}78\ R$ от оси трубы, тогда как раньше указанная средняя величина на расстоянии $r = 0{,}75\ R$. ($v$ есть скорость газа на расстоянии $r$ от оси трубы).

**§ 130. Счетчики тепла.** При *водяном отоплении* тепло производится централизовано и посредством циркулирующей воды, в качестве теплоносителя, распределяется между различными потребителями; *холод* в центральных холодильных установках распределяется аналогичным путем. В обоих случаях полезно знать расход отдельных потребителей. Измерять для этого только количество жидкости достаточно лишь тогда, если обратная температура теплоносителя у всех потребителей будет одинакова. Однако, это достижимо только при специальной предварительной, сообразно обстоятельствам, установке запорных органов. При последующем же дросселировании потока соответствующий потребитель может извлекать из теплоносителя больше тепла.

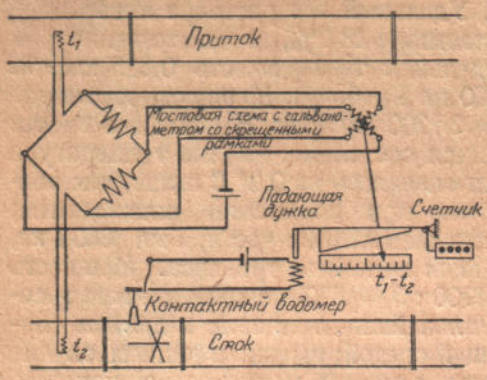



Рис. 369. Механическо-электрический счетчик тепла, фирмы «Сименс-Гальске».

Поэтому счетчики тепла или холода должны измерять как количество, так и разницу температур у отдельного потребителя и уже произведение обеих величин должно указываться счетчиком. На рис. 369 водомер приводит в действие падающую скобу всякий раз, как пройдет определенное количество теплоносителя; ход скобы, действующей на счетчик, определяется разностью температур $t_1 - t_2$, причем мостик с прибором со скрещенными катушками уравновешен

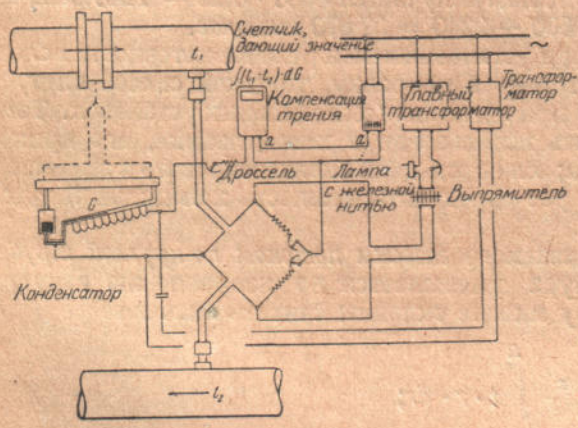



Рис. 370. Электрический счетчик тепла, фирмы «Гальвакс и Ланген».

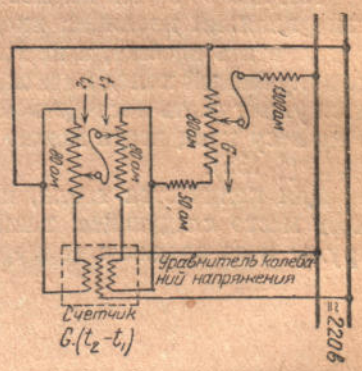



Рис. 371. Счетчик тепла на переменном токе, фирмы «Эккардт».

таким образом, что показания независимы от температуры, а только от их разности. В счетчике тепла (рис.370) применены конструктивные элементы паромера, изображенного на рис. 224 той же фирмы. Циркулирующая жидкость в дроссельном приборе действует на ртутный столб. Ртуть, перекрывая сопротивления, изменяет силу тока, проходящего через мостик. В соседние ветви этого мостика включены термометры $t_1$ и $t_2$. Следовательно на ток, идущий в счетчик, воздействуют обе величины $m$ и $t_1 - t_2$, которые действуют на обе левые клеммы счетчика; при *aa* компенсируется пусковое трение, так что длительный незаметный расход не может остаться неучтенным. Затруднения с контактами ртутного столба устраняются переменным напряжением, которое налагается на действующий в мостике постоянный ток. Оба рода тока разделяются друг от друга обычным образом, посредством дроссельной катушки и конденсатора. Наконец,

рис. 371 показывает схему счетчика тепла, построенного на принципах рис. 43 и 44, которая может быть непосредственно приключена к осветительной сети.

Все эти устройства (Л.) применимы именно тогда, когда циркуляция теплоносителя осуществляется искусственно, при циркуляции же термосифоном развиваемая энергия недостаточна для измерения количеств. В принципе, такие счетчики тепла применимы и в том случае, когда вместо жидкости теплоносителем является воздух; однако и здесь энергия слишком мала для измерения количеств. Тогда можно обратиться к вспомогательным сервомоторным устройствам, которые получили значительное развитие в последние годы; однако, стоимость такой аппаратуры для целей только измерения является высокой, если с этим не связывать задач автоматического регулирования; изображенные на рис. 369—371 приборы не дешевы.

При *паровом отоплении низкого давления* измеряются конденсат открытыми водомерами; особенно подходящим для этого является барабанный водомер по рис. 210; хотя температура конденсата может быть столь же различна, как температура обратной воды при водяном отоплении, однако это, по сравнению с большой величиной теплоты конденсации, имеет малое значение.

**§ 131. Количество тепла в воздухе, влажность воздуха.** Для воздуха в качестве теплоносителя необходимо принимать во внимание влияние влажности хотя бы потому, что удельная теплоемкость водяного пара составляет почти 0,5 *ккал/кг · град*, против 0,24 *ккал/кг · град* для сухого воздуха. Кроме того, благодаря явлениям испарения и конденсации, содержание влаги может изменяться и таким образом должны быть учтены большие количества тепла, соответственно скрытой теплоте испарения. При охлаждении от 20 до 10°, сам по себе 1 *кг* воздуха отдает только 2,4 *ккал*. Но, если воздух сначала был насыщенным и, следовательно, содержал 15 *г* влаги на 1 *кг* чистого воздуха, тогда как при 10° в нем может остаться только 8 *г*, то остальные 0,007 *г* воды выпадают и отдают около $0{,}007 \cdot 587 = 4{,}1$ *ккал*, т. е. почти двойное количество по сравнению с отдаваемым самим воздухом; только $^1/_3$ всего оборота тепла, таким образом, относится к теплоемкости, а $^2/_3$ происходят от конденсации водяного пара.

В основе расчетов, касающихся смесей из воздуха и водяных паров, лежит закон *Дальтона*, согласно которому обе наполняющие пространство составные части ведут себя так, как если бы другого газа вовсе не было. Парциальные давления составных частей суммируются и дают общее давление, например, указываемое барометром.

Часто можно без заметной погрешности представлять вопрос так, как будто каждая находящаяся под общим давлением составная часть заполняет часть общего объема, так что *парциальные объемы* суммируются в один общий объем. Расширяя *Дальтоновское положение*, следует также предположить, что кривая давлений насыщенного пара не изменяется одновременным присутствием воздуха и столь же мало изменяется и темплоемкость обеих составных частей, так что теплосодержание смеси можно получать, как сумму теплосодержаний составных частей и удельную теплоемкость смеси можно определять по правилу смешения. Эти дальше идущие, по существу самостоятельные, допущения рассматриваются как следствие закона Дальтона и объединяются под его именем.

Оперирование при расчетах с одной стороны парциальными давлениями, с другой — парциальными объемами приводит к одному и тому же результату лишь тогда, когда при суммировании объемов при смешении можно рассматривать законы Бойля-Мариотта и Ге-Люссака действительными для смеси, также как и для составных частей, что опять лишь частично оправдывается, причем газовая константа смеси получается из газовых констант составных частей по правилу смешения. Однако, последнее допущение в нашем случае может быть лишь приближением уже потому, что для водяного пара вблизи точки насыщения, принятие единой газовой константы также является лишь приближением, которое допустимо лишь тогда, когда при более низких температурах и не слишком малых давлениях количества пара являются малыми сравнительно с массой воздуха.

Для парообразования в воздухе имеет значение кривая давлений, дающая зависимость между общим давлением и температурой, для конденсации же такая же кривая давлений, но между парциальным давлением пара и температурой. Если температура воды лежит между температурами, соответствующими общему давлению и парциальному давлению пара или парциальное давление пара меньше, а общее давление больше соответствующего температуре давления насыщенного пара, то вода находится в области испарения, т. е. только поверхностного, не происходящего изнутри наружу (так как внутренность жидкости находится под общим давлением) парообразования. К этой области испарения и относятся вопросы измерения влажности.

В области испарения парциальное давление пара меньше чем то, которое соответствует состоянию насыщения. *Относительная влажность* $\varphi$ есть отношение наличного парциального давления пара $p_d$ к давлению насыщенного пара $p_t$ при данной температуре $t$. Таким образом, на основании определения относительной влажности, получим:

$$\varphi = p_d/p_t; \text{ или } \varphi\,\% = 100 \cdot p_d/p_t. \tag{5}$$

Предполагая, что закон Ге-Люссака действителен для смеси точно так же, как и для составных частей, исчисляют плотность смеси $\gamma$ в *кг/м*³, как сумму плотностей $\gamma_e$ и $\gamma_d$ составных частей, данных также в *кг/м*³ и отнесенных к объему смеси; таким образом, получается также

$$\varphi = \gamma_d/\gamma_t \text{ или } \varphi\,\% = 100 \cdot \gamma_d/\gamma_t. \tag{6}$$

$\gamma_t$ — плотность пара в состоянии насыщения при господствующей температуре, следовательно и при давлении $p_t$.

*Для исчисления количеств тепла и теплосодержаний* все вычисления относятся к 1 *кг* воздуха (газа), так как на массу воздуха не оказывает влияния ни испарение, ни конденсация. Если, таким образом, 1 *м*³ влажного воздуха состоит из $\gamma_l$ *кг* собственно воздуха и из $\gamma_d$ *кг* пару, то $\gamma_d/\gamma_l$ дают также влажность воздуха. При температуре $t_0$ и при относительной влажности $\varphi$ теплосодержание будет

$$i_{t\varphi} = c_p \cdot t + \frac{\gamma_d}{\gamma_l} \cdot i_d \frac{\text{ккал}}{\text{кг воздуха}};$$

$c_p$ означает удельную теплоемкость воздуха в *ккал/кг · град*, $i_d$ — теплосодержание пара в *ккал/кг* при некотором давлении $p_d$ и температуре $t$. Пар в общем здесь можно рассматривать как перегретый. Здесь $i_d$ следует определять по правилам § 135 или находить из $p_d$ и $t$ при помощи *is*-диаграммы; если же $\gamma_d$ мало в сравнении с $\gamma_l$, как это обычно бывает при низких температурах, тогда можно также принимать $i_d = \lambda_p + 0{,}48\,(t - t_s)$, где $\lambda_p$ представляет общую теплоту насыщенного пара, соответствующую давлению пара $p_d$ при его температуре насыщения $t_s$ и 0,48 — удельная теплоемкость перегретого пара. Еще проще — воспользоваться тем фактом, что теплосодержание часто совсем не зависит от давления, а только от температуры. Изотермы перегрева на *is*-диаграмме вблизи насыщения при температурах до 100° также проходят почти точно горизонтально и для перегретого пара приблизительно будет $i_d = \lambda_t$, подобно общему теплосодержанию насыщенного пара при *той же температуре*, но соответственно высшему давлению. Недопустимо напротив пренебрегать теплотой перегрева и просто допускать $i_d = \lambda_p$. При средних степенях влажности ошибка будет заметной.

В качестве *примера* хода расчета могут служить цифровые данные таблицы 27 для $t = 70°$ и для $t = 20°$ при 760 *мм* давления.

Из этих цифр можно видеть, что интерполяция $i_t\varphi$ между $i_{t0}$ и $i_{t1}$ не дает для различных степеней влажности точных результатов, если теплосодержание относить к 1 *кг* воздуха; по отношению же к 1 *м*³ такая простая интерполяция становится возможной. При низких температурах, когда $\gamma_l$ практически во всех случаях одна и та же, так как $p_d$ мало, можно интерполировать точнее.

Таблица 27

**Пример расчета свойств влажного воздуха**

*а) Температура 70°, давление 760 мм* Hg

| Относительная влажность $\varphi$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Давление пара $p_d = \varphi p_t$ *мм* Hg | 0 | 46,6 | 93,2 | 139,9 | 186,5 | 233,1 |
| Плотность пара $\gamma_d = \varphi \gamma_t \cdot$ *кГ/м³* | 0 | 0,0396 | 0,0792 | 0,119 | 0,158 | 0,198 |
| Давление воздуха $p_t = p - p_d$ *мм* Hg | 760 | 713 | 667 | 620 | 573 | 527 |
| Плотность воздуха $\gamma_t$ *кГ/м³* | 1,030 | 0,965 | 0,904 | 0,840 | 0,776 | 0,713 |
| Содержание пара $\gamma_d/\gamma_t$ $\frac{\text{кГ пара}}{\text{кГ воздуха}}$ | 0 | 0,0410 | 0,0877 | 0,1414 | 0,2045 | 0,2780 |
| Теплосодержание 1 *кг* пара *ккал/кг* | 628,1 | 627,9 | 627,7 | 627,4 | 627,2 | 627,0 |
| Теплосодержание 1 *кг* воздуха $i_t, \varphi = 0{,}238 \cdot 70 + \frac{\gamma_d}{\gamma_t} \cdot i_1 \cdot \frac{\text{ккал}}{\text{кг воздуха}}$ | 16,5 | 42,2 | 71,6 | 105,3 | 145,0 | 190,8 |
| Разность | 25,7 | 29,4 | 33,7 | 39,7 | 45,8 | |

*б) Температура 20°, давление 760 мм*

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Содержание пара $\gamma_d/\gamma_t$ $\frac{\text{кг пара}}{\text{кг воздуха}}$ | 0 | 0,00287 | 0,00576 | 0,00869 | 0,01164 | 0,01462 |
| Теплосодержание $i_t, \varphi$ $\frac{\text{ккал}}{\text{кг воздуха}}$ | 4,71 | 6,44 | 8,19 | 9,96 | 11,74 | 13,54 |
| Разность | 1,73 | 1,75 | 1,77 | 1,78 | 1,80 | |

Результаты таких расчетов теплосодержания, отнесенного к 1 *кг* воздуха, показывают рис. 372 и 373. Здесь $i$ определяется из $t$ и $\varphi$, при предположении общего давления $p = 760$ *мм* Hg.

Отношения при *температурах ниже* 0° С, где нормально наступает замерзания и вода остается жидкой лишь при переохлаждении или увеличенном давлении, приведены в таблице 28.

Давление насыщенного пара $p_E$ над льдом, при одинаковой температуре меньше, чем $p_W$ над водой.

Таблица 28

**Пар над водой и льдом (частично по Ландольту и Бернштейну)**

| Температура $t$ С | 0 | —5 | —10 | —15 | —20 |
|---|---|---|---|---|---|
| Давление насыщенного пара над льдом $p_E$ (*мм* Hg) | 4,58 | 3,01 | 1,95 | 1,24 | 0,78 |
| Давление насыщенного пара над водой $p_W$ (*мм* Hg) | 4,58 | 3,17 | 2,16 | 1,44 | 0,96 |
| Разность | 0 | 0,16 | 0,21 | 0,20 | 0,18 |
| Отношение $\frac{p_W}{p_E}$ | 1 | 1,05 | 1,11 | 1,16 | 1,23 |
| Теплота плавления льда $s$ (*ккал/кг*) | 80 | 77,5 | 75 | 72,5 | 70 |
| Теплота испарения воды $r_W$ (*ккал/кг*) | 594,5 | 597,5 | 600,0 | 602,5 | 605,5 |
| льда $r_E$ (*ккал/кг*) | 674,6 | 675 | 675,0 | 675,0 | 675,5 |
| Плотность насыщенного пара над льдом $\gamma_E$ (*кг/м³*) | 0,00489 | 0,00324 | 0,00214 | 0,001385 | 0,00088 |

При действительно наблюдаемом давлении пара $p_d$ исчисляется относительная влажность:

$$\varphi_E = p_d/p_E \text{ или } \varphi_E\,\% = 100\ p_d/p_E. \qquad (5E)$$

Здесь следует поставить $p_E$, но не $p_W$, так как ниже 0° С лед представляет устойчивое состояние и при конденсации ниже нуля всегда образуется лед, но не вода. Это соответствует также потребностям холодильной промышленности. В холодильниках степень влажности должна быть в известной мере меньше состояния насыщенности, чтобы, при неизбежных небольших колебаниях температуры, пары не конденсировались на продуктах. Поэтому требуется (подразумевается: также и в моменты, когда при таких колебаниях температура достигает своего наинизшего значения), чтобы влажность не переходила некоторого определенного значения. Естественно, что речь идет о том, чтобы количество паров было далеко от состояния насыщения надо льдом, тем более, что давление насыщения над замороженным мясом, следовательно, над содержащим соль льдом, еще несколько ниже, так что осаждение льда может наступить уже при $\varphi_E < 1$. (Планк, Л.), а также правила для холодильных установок (Л.)

Это едва ли необходимо упоминать, если бы Прусский метеорологический институт не давал как относительную влажность $\varphi_W = p_d/p_W$; это должно соответствовать: «вполне очевидно природе вопроса, так как в гильзу термометра постоянно поступают все новые массы воздуха, в общем никогда не насыщенного, так что содержание паров воды или их максимальное давление не зависит от малых количеств льда, которое находится на влажном термометре (психрометра)».

Это обоснование не является убедительным, если даже не считаться с тем, что оно касается только психрометра, который применяется только в одном специальном случае *измерения*. Ниже нуля лед представляет устойчивую, вода же только неустойчивую форму и не только на влажном термометре, но и сама по себе. Воздух при $t = -10$ и $p_d = 2{,}02$ *мм* Hg должен по существу обозначаться как пересыщенный и $\varphi_E = 1{,}037 > 1$ указывает также на пересыщение; при том это для понятия пересыщения бесполезно, имеются ли ледяные массы или нет.

Речь идет не о метеорологическом вопросе, который метеорологический институт, как нам кажется, решил неправильно, но об основной технической задаче — определении степени влажности в холодильных камерах. Поскольку при испытаниях мощности речь идет об определении теплосодержания, вопрос об определении понятия $\varphi$ является безразличным, так как оба изложения, последовательно проведенные, приводят к тем же самым содержаниям водяного пара и к тем же теплосодержаниям.

**§ 132. Психрометр.** Действующей частью психрометра являются два одинаковых термометра. Шарик одного из них обтянут кисейным чулком (который перед отсчетом увлажняется), шарик второго остается открытым. Благодаря охлаждению от испарения, влажный термометр показывает меньше, чем сухой, разница между обоими показаниями — *психрометрическая разность* — будет тем больше, чем суше воздух, чем следовательно, энергичней воздух поглощает влагу из покрывающей шарик термометра кисеи и, таким образом, проявляет охлаждающее действие испарения.

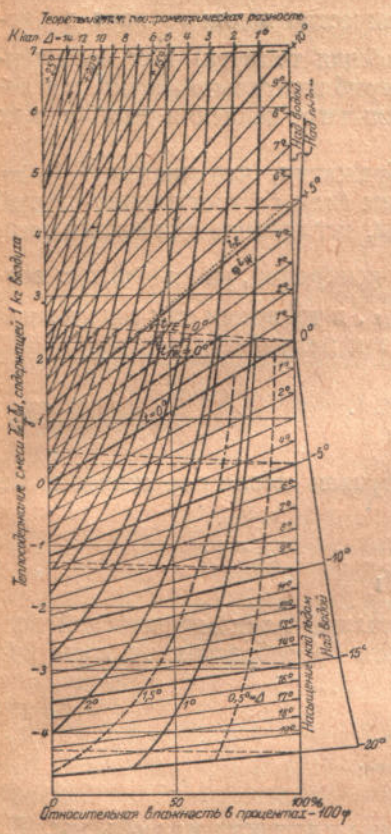
Психрометрическая разность зависит от конвекции вблизи термометра. Если воздух застаивается около влажного термометра, то в отношении влажности скоро устанавливается род состояния насыщения, в то время как из окружающей среды притекает тепло. Психрометрическая разность не достигает своей полной величины, если психрометр держать неподвижно в спокойном воздухе. Обозначим наибольшую теоретически достижимую психрометрическую разность через $\Delta$, тогда как $t$ и $t_f$ будут температуры, указываемые обоими термометрами, так что $t - t_f$ будет фактически наблюдаемой психрометрической разностью. В уравнении

$$\frac{t - t_f}{\Delta} = a;\ \Delta = \frac{t - t_f}{a}; \qquad (8)$$

таким образом $a < 1$ зависит от условий конвекции. Величину $a$ можно назвать *коэфициентом доброкачественности* психрометра.

На рис. 372 и 373 начерчен ряд кривых одинаковой психрометрической разности $\Delta$, по которым, в соединении с линиями температур $t$ сухого термометра, можно отсчитать относительную влажность как абсциссу или, в случае надобности, также теплосодержание $i$, как ординату. Построение этих кривых основано на следующей *теории психрометра*.

В потоке воздуха с состоянием $(t, \varphi)$, сухой термометр просто показывает $t$, предполагая, что измерение производится с соблюдением предосторожностей, требуемых в отношении влияния излучения. Влажный термометр устанавливается так, что убыль теплосодержания проходящей мимо щарика паровоздушной смеси равна теплоте парообразования затраченной на испарение на влажном термометре. Иначе говоря: теплосодер-



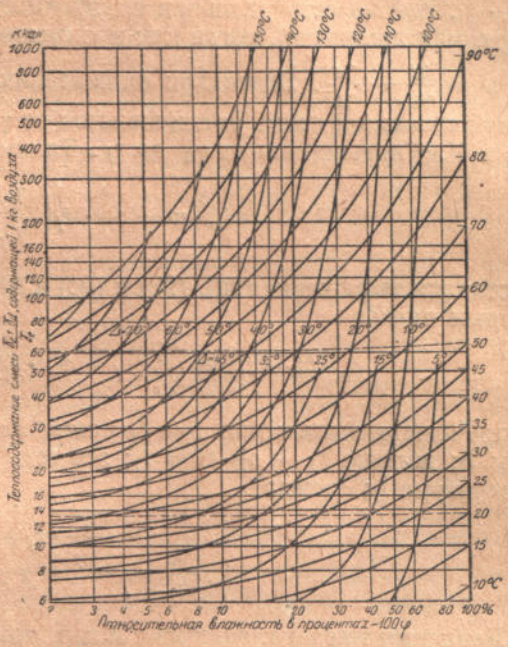




Рис. 372 и 373. Теплосодержание влажного воздуха и теоретическая психрометрическая разность $\Delta$ для состояния барометрического давления 760 *мм* Hg.

жание отходящего, насыщенного на влажном термометре, воздуха равно сумме теплосодержания $i_t\varphi$ притекающего, более сухого воздуха и теплосодержания $i_w \cdot w$ испаренного количества влаги $w$ до ее испарения. При этом и теплосодержание и испаренное количество следует относить к 1 *кг* сухого воздуха, так как вес воздуха при этом явлении не изменяется, в то время как меняются и объем, и вес смеси. Уравнение тепла между притекающим воздухом, испаряющейся влагой и отходящим воздухом будет

$$i_{f_1} = i_{t\varphi} + i_W \cdot w, \tag{9}$$

где $i_{f_1}$ выражает теплосодержание воздуха в состоянии насыщения ($\varphi = 1$) при температуре $t_f$.

Все три члена уравнения (9) могут быть выражены через измеряемые величины и соответствующие постоянные для воздуха и пара. Прежде всего

$$i_{f_1} = c_p \cdot t_f + \frac{\gamma_f}{\gamma_{lf}} \cdot \lambda_f. \tag{9a}$$

Так как $\varphi = 1$, то $\gamma_f$ будет количество влаги при насыщении, $\lambda_f$ полное теплосодержание при температуре $t_f$. Вызванное испарением охлаждение изменяет

не давление, а температуру составных частей воздуха, поэтому в числителе второго члена поставлено $\gamma_{lf} > \gamma_l$, соответствующее температуре $t_f$.

Дальше

$$i_{t\varphi} = c_p \cdot t + \frac{\gamma_d}{\gamma_l} \cdot \lambda_t. \tag{9б}$$

$c_p$ в *ккал/град кг* — удельная теплоемкость воздуха, которого в рассматриваемом количестве смеси находится 1 *кг*; $\gamma_d$ *кг/м*³ — плотность пара, тогда как $\gamma_l$ *кг/м*³ — плотность воздуха в смеси. Так как рассматриваемая смесь занимает объем $\frac{1}{\gamma_l} \cdot \frac{м^3}{кг\ \text{воздуха}}$, то $\gamma_d/\gamma_l$ представляет количество водяного пара в рассматриваемой смеси; $\lambda_t$ есть теплосодержание (общая теплота) 1 *кг* насыщенного пара при той же температуре $t$, которое приблизительно равно теплосодержанию перегретого пара низкого парциального давления при $p$ как изложено выше.

Наконец, член $i_W \cdot w$ получается из соображения, что численно $i_W = c_W \cdot t_f$, где $c_W$ есть удельная теплоемкость воды (или соответственно другой испаряемой жидкости), тогда как количество воды, испаренное для насыщения, есть $w = \frac{\gamma_f}{\gamma_{lf}} - \frac{\gamma_d}{\gamma_l}$. Благодаря охлаждению при испарении, удельный вес воздушной составной части увеличивается от $\gamma_l$ до $\gamma_{lf}$, в то время как содержание пара в 1 *м*³ подымается от $\gamma_d$ до $\gamma_f$. Таким образом получается

$$i_w \cdot w = c_W \cdot t_f \left( \frac{\gamma_f}{\gamma_{lf}} - \frac{\gamma_d}{\gamma_l} \right). \tag{9c}$$ [1]

Подставляя выражение (9a), (9b) и (9c) в (9), получаем после перестановки некоторых членов

$$c_p \cdot (t - t_f) = \frac{\gamma_f}{\gamma_{lf}} (\lambda_f - c_W \cdot t_f) - \frac{\gamma_d}{\gamma_l} (\lambda_t - c_W \cdot t_f).$$

В полученном выражении $t - t_f$ равно *теоретической* психометрической разности $\Delta$; дальше $\lambda_f - c_W \cdot t_f = r_f$; это есть теплота парообразования воды при температуре $t_f$; отсюда

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_l} = \frac{\frac{\gamma_e}{\gamma_{lf}} \cdot r_f - \Delta \cdot c_p}{\lambda_t - c_W\ t_f}. \tag{10}$$

Давления пара находят из таблиц, так же как плотности или объемы. По уравнению состояния при определенной температуре

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_l} = \frac{p_d}{p_l} \cdot \rho \text{ и } \frac{\gamma_f}{\gamma_{lf}} = \frac{p_f}{p_{lf}} \cdot \rho,$$

где

$$\rho = \frac{R_l}{R_d}$$

есть отношение газовых постоянных обеих составных частей; тогда

$$\frac{p_d}{p_l} = \frac{\frac{p_f}{p_{lf}} \cdot \rho \cdot r_f - \Delta \cdot c_p}{\lambda_t - c_W \cdot t_f} \cdot \frac{1}{\rho}.$$

---

[1] Этот ход мысли для теории психрометра, который далеко расширяет ее приложение, первый раз был дан в 1920 г. в 4 издании этой книги; тогда в формуле (9c) вместо выражения в скобках было поставлено $\frac{\gamma_f - \gamma_d}{\gamma_{lf}}$. Эта погрешность в выводе была исправлена Эбертом и Пфейфером: Z. für. Phisik т. 46 (1928), стр. 420. На результаты эта погрешность едва ли имеет заметное влияние, но мы не получаем формулы (11) как законченного выражения, и должны довольствоваться графическим решением, которое представляет соотношения более сложными, чем на самом деле.

Получаем после преобразования:

$$p_d = \frac{b}{1 + \dfrac{\lambda_t - c_W\, t_f}{\dfrac{p_f}{b - p_f} \cdot r_f - \dfrac{\Delta \cdot c_p}{\rho}}}. \qquad (11)$$

где $b = p_d + p_l$ (определяется при помощи барометра) и $p_{lf} + p_f = b$. Для вычисления удобно еще подставить

$$\lambda_t - c_W t_f = \frac{\lambda_t - \lambda_f}{t - t_f} \cdot \Delta + \lambda_f - c_W\, t_f = \frac{d\lambda}{dt} \cdot \Delta + r_f,$$

так как $d\lambda/dt$ для большой области температур остается постоянной и легко получается из таблиц; тогда давление паров, имеющихся в воздухе будет:

$$p_d = b \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{\dfrac{d\lambda}{dt} \cdot \Delta + r_f}{\dfrac{p_f}{b - p_f} \cdot r_f - \dfrac{c_p}{\rho} \cdot \Delta}}. \qquad (12)$$

Относительная влажность опять получается по формуле:

$$\varphi = p_d/p_t \text{ или } \varphi\,\% = 100 \cdot p_d/p_t. \qquad (5)$$

В формуле (12):

$b$ — означает показание барометра или общее давление;

$d\lambda/dt$ — изменение теплосодержания насыщенного пара в зависимости от температуры в области от $t_f$ до $t$;

$r_f$ — теплота парообразования при температуре $t_f$;

$c_p$ — удельная теплоемкость газов (при постоянном давлении) в *ккал/кг · · град*; для воздуха $c_p = 0{,}241$;

$\rho = R_l/R_d$, отношение газовых постоянных обеих составных частей; для влажного воздуха $\rho = 29{,}27 : 47{,}05 = 0{,}622$;

$p_t$, $p_f$ — давление насыщенного пара при температурах $t$ и $t_f$.

Наконец, остается подставить $\Delta = \frac{t - t_f}{a}$; если по обоим термометрам отсчитаны температуры $t$ и $t_f$, то разность нужно разделить на коэфициент доброкачественности $a$ психрометрического устройства, чтобы ввести в формулу *теоретическое понижение температуры* $\Delta$. Для коэфициента доброкачественности всасывающего психрометра Ассмана (рис. 374) Эберт и Пфейфер, на основании изысканий в Физико-техническом Государственном институте (Германия) дают следующие значения:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Температура $t$ . . . . . | 30 | 40 | 60 | 90 | 120° C |
| Коэфициент доброкачественности психрометра . . . . . $a$ | 0,995 | 0,985 | 0,955 | 0,95 | 0,95 |

При этих изысканиях действительное содержание водяных паров в воздухе определялось путем поглощения. Точность оценивается ими в 1%.

Уравнения (10) и (12) могут поэтому служить для вычисления $\gamma_d$ или $p_d$ в широкой области температур и для любой пары веществ, если известны их константы. Мы получаем при этом весовую часть или парциальное давление составной части, которой мы смачиваем чулок влажного термометра.

Упрощения получаются, если $\frac{d\lambda}{dt} \cdot \Delta$ мало по сравнению с $r_f$.

Так, при *низких температурах*, например до $+40°$ C, $d\lambda/dt \sim 0{,}5$, что можно видеть из таблиц водяного пара или из того, что удельная теплоемкость воды (1) во столько же раз больше удельной теплоемкости пара (0,5). $\Delta$ имеет значение нескольких градусов, $r_f$ — напротив, значение около 600. Поэтому величиной $\frac{d\lambda}{dt}\Delta$ можно пренебречь по сравнению с $r_f$ и дальше можно $b - p_f$

*приближенно заменить через b*. Тогда из (12) получается.

$$p_d = b \cdot \frac{1}{1 + \frac{r_l}{\frac{p_l}{b} \cdot r_l - \frac{c_p}{\rho} \cdot \Delta}} = b \cdot \frac{\frac{p_l}{b} \cdot r_l - \frac{c_p}{\rho} \cdot \Delta}{\frac{p_l}{b} \cdot r_l - \frac{c_p}{\rho} \cdot \Delta + r_l}.$$

В знаменателе $r_l$ опять является значительно преобладающим по величине членом по сравнению с каждым из остальных, а тем более по сравнению с их разностью; если поэтому пренебречь обоими первыми членами знаменателя, то получится приближенная формула

$$p_d = p_l - b \cdot \frac{c_p}{\rho \cdot r_l} \cdot \Delta. \qquad (13)$$

Формулы аналогичные (13) часто применяются в психрометрических измерениях на том основании, что психрометрическая разность должна быть пропорциональной недостающей величине давления пара в воздухе, протекающем мимо влажного термометра, т. е. величине $p_l - p_d$[1]. Эта упрощенная форма теории не придает никакого значения постоянной $c = \frac{c_p}{\rho \cdot r_l}$; полная теория дает эту постоянную, поэтому и возможность вычислить значение $c$ для любых случаев, в особенности для других давлений (не только для атмосферного) и для других компонентов, кроме воздуха и водяного пара.

В практически важных случаях, именно в метеорологии, холодильных установках, а также часто в сушилках, общее давление почти нормальное атмосферное, а давление пара — мало. Если написать

$$p_d = p_l - \frac{b}{760} \cdot \frac{760 \cdot c_p}{\rho \cdot r_l} \cdot \Delta \text{ мм Hg},$$

то для постоянной $c' = \frac{760 \cdot c_p}{\rho \cdot r_l}$ получаются значения, приведенные в таблице 30. Вводя сюда также коэфициент доброкачественности, можно положить $c'/a = 0{,}5$, после чего получается

$$p_d = p_l - \frac{b}{760} \cdot 0{,}5\,(t - t_l) \text{ мм Hg}. \qquad (14)$$

Эта давно известная психрометрическая формула Шпрунга метеорологов, постоянная которой таким образом обосновывается теоретически. Главная Геофизическая Обсерватория пользуется этой формулой. На ней основаны приводимые во многих книгах психрометрические таблицы (Л.).

У хорошо сконструированных психрометров психрометрическая разность остается лишь немного ниже теоретической; на постоянство показаний психрометра и независимость последних от случайностей можно рассчитывать лишь тогда, если $a \sim 1$. В особенности при недостаточной вентиляции $t - t_l$ будет значительно отклоняться от теоретического значения и потому $c'$ будет больше, а также несомненно будет больше зависеть от конвекции.

По Сиперу (Л.) повышение скорости воздуха выше 3 *м/сек* не имеет никакого влияния на показание психрометра.

Относительно возможности доводить и без просасывания коэфициент доброкачественности $a$ до 0,9 говорит Вальд (Л.).

Не следует говорить, что благодаря искусственной вентиляции также увеличивается и подвод тепла воздухом температуры $t$. Благодаря большей концентрации жидкой фазы по сравнению с газообразной, слой воздуха, прилипающий к обтягивающей термометр влажной кисее, насыщается влагой *при всех условиях моментально*; поэтому речь идет лишь о том, чтобы постоянно давать возможность новому испарению.

---

[1] Мюллер-Пулье. Учебник физики, 10 изд., том 3 (1907) стр. 831 и другие учебники. Там вычислено $\gamma_d$, почему после запятой стоят 3 нуля.

Таблица 30

**Психрометрические константы Шпрунга**

$$c' = \frac{760 \cdot c_p}{\rho \cdot r_f} = \frac{760 \cdot 0{,}241}{0{,}622 \cdot r_f} = \frac{294{,}5}{r_f}.$$

| | Над водой | | | Над льдом | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $t =$ | 40 | 20 | 0 | 0 | — 10 | — 20° C |
| $r =$ | 573 | 584 | 595 | 674,5 | 675 | 675,5 |
| $c' =$ | 0,514 | 0,504 | 0,495 | 0,437 | 0,4365 | 0,436 |
| $a =$ | 0,985 | 0,995 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $c'/a =$ | 0,522 | 0,507 | 0,495 | — | — | — |
| | Среднее значение | | 0,508 | — | 0,44 | — |

Условия *при температурах ниже* 0° С требуют особого рассмотрения. Когда, после смачивания кисейного чулка, термометр падает, то большей частью ртуть останавливается у 0° до тех пор, пока под влиянием охлаждения от испарения не замерзнет *вся* вода и только после этого она падает дальше до $t_f$. Однако, часто ртуть сперва опускается ниже 0°, вода таким образом переохлаждается, после чего наступает образование льда, и ртуть подымается до 0° и опять останавливается, пока не закончится образование льда. Когда, наконец, вся вода замерзнет, то ртуть равномерно опускается до $t_f$. Таким образом, только по достижении термометром установившегося состояния можно судить о том, закончилось ли образование льда или нет; затем лед продолжает испаряться.

Пока вода на влажном термометре остается в переохлажденном жидком состоянии, то, по сравнению с состоянием выше нуля, ничего в смысле измерительной техники не меняется, так как переохлажденное состояние является непрерывным продолжением состояния выше 0°; такое неустойчивое состояние не имеет значения, пока переход в устойчивое замерзшее состояние фактически не наступил. Поведение термометра $f$ точно так же не затрагивается этим теоретическим фактом. Таким образом, и ниже 0° при переохлажденной воде на влажном термометре действительна формула Шпрунга (14).

Когда же кисейная оболочка замерзнет, то поведение влажного термометра (употребляя это выражение и дальше) будет определяться равновесием *между льдом* и парами.

Для замерзшей кисейной оболочки будет действительна формула

$$p_d = p_{fE} - b \cdot \frac{c_p}{\rho \cdot r_{fE}} \cdot \Delta, \qquad (13E)$$

причем $p_{fE}$ и $r_{fE}$ обозначают значения $p_E$ и $r_E$ при температуре $t_f$ в таблице 28. Правая половина таблицы дает для $\frac{760 \cdot c_p}{\rho \cdot r_{fE}} \cdot \frac{1}{a}$; среднее значение $c'_E/a = 0{,}44$, поэтому мы должны написать *формулу Шпрунга для замерзшей кисейной оболочки* так:

$$p_d = p_{fE} - \frac{b}{760} \cdot 0{,}44\ (t - t_f)\ \text{мм Hg}. \qquad (14E)$$

Для замороженной оболочки можно также переписать и полную формулу (12), вводя $d\lambda_E/dt$ и $r_{fE}$; однако при низких температурах достаточна приближенная формула.

Само собой понятно, что мы получим для $p_d$ *то же самое* значение при измерении как с переохлажденной, так и с замороженной оболочкой; $p_d$ характеризует воздух, в котором нет ни воды, ни льда. Измерение производится различно, поэтому различно и вычисление; результат же получается одинаковый.

Поэтому для выбора $c = 0{,}5$ или $c_E = 0{,}44$ и для введения в формулу (5E) $p_{fW}$ или $p_{fE}$ решающим является только *фактическое состояние* влажного термометра (кисейная оболочка которого, вследствие охлаждения от испарения, может замерзнуть и при $t > 0$).

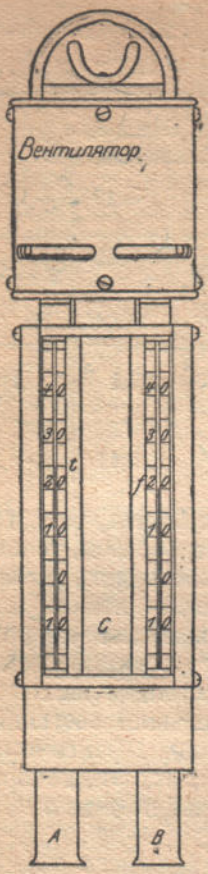
Рассматривать ли $\varphi_W$ вместо $\varphi_E$, зависит от того, делят ли вычисленную величину $p_d$ на $p_{tW}$ или на $p_{tE}$. Таким образом, если в каком-либо пространстве господствует парциальное давление $p_d = 1{,}65$ *мм* Hg, при $t = -10°$, то относительная влажность по отношению ко льду будет

$$\varphi_E = \frac{1{,}65}{1{,}95} = 0{,}846;$$

отнесенная к воде, будет

$$\varphi_W = \frac{1{,}65}{2{,}16} = 0{,}764.$$

В качестве психрометра может служить любая пара однотипных хороших термометров. Так как для этого имеет значение хорошая конвекция, главным образом, для влажного термометра, чтобы охлаждение от испарения сделать достаточно большим по сравнению с выравнивающим влиянием теплопроводности, то оба термометра иногда соединяют в простом жестяном штативе и вращают их на конце шнура (центробежный или пращевой психрометр). Однако, удобнее конструкция *аспирационного психрометра* (рис. 374, 375 и 376). Оба термометра — сухой $t$ и мокрый $f$ — установлены в никелированном кожухе так, что они защищены (для метеорологических целей) от солнечного и других излучений. Кожух, для дальнейшего уменьшения излучения, тщательно никелирован и должен содержаться вполне чистым; шарики термометров окружены двойным защитным кожухом из никелированной жести. Головка прибора представляет маленький вентилятор с пружинным заводом, который всасывает воздух через трубки $A$, $B$ и $C$ так, что шарики обоих термометров равномерно омываются воздухом.



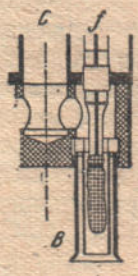




Рис. 374—376. Аспирационный психрометр Ассмана.

Для смачивания влажного термометра водой служит стеклянная трубочка с резиновым баллоном (рис. 376); открывая зажим и нажимая на баллон, догоняют воду до метки $M$, закрывают зажим и вводят стеклянную трубочку в устье $B$; после этого заводят пружину. Весьма важно, чтобы сухой термометр действительно был сухим, поэтому влажный термометр нельзя увлажнять пульверизацией. Также важно, чтобы употребляемая вода была чиста; следует брать дестиллированную воду, так как давление водяных паров (от которого зависит испарение) бывает ниже над соляным раствором, чем над чистой водой. Если употребляют обыкновенную воду, то соли сгущаются на кисейной оболочке, поэтому ее надо *чаще* менять. Влажный термометр должен достаточно долго оставаться влажным, чтобы успеть притти в стационарное состояние, т. е. количество воды для смачивания чулка психрометра должно быть достаточным. Так, например, термометр с простым влажным кисейным чулком, внесенный в пространство с температурой 61,7°, показал через 4 минуты температуру 29,6°, затем к 19 минуте медленно поднялся до 30,4°; следующие минутные отсчеты были

Рис. 376. Резиновый баллон для увлажнения.

30,6; 31,2; 32,2; 35,5; 39,5° . . . .; отсюда можно заключить, что влага держалась до 18 минуты, хотя для $t = 61{,}7°$ и $t_l = 30{,}0°$ относительная влажность получается только в 10,5% и испарение, следовательно, идет быстро. Если смена воды не должна вносить перерывов в измерение, то вода для увлажнения должна иметь температуру $t_l$.

*При длительной эксплоатации* психрометра, конечно, необходимо позаботиться о непрерывном подводе воды. Для производственных надобностей, большей частью, для замера температур применяют термопары (рис. 377), причем можно непосредственно отсчитывать разность $t—t_l$, как таковую. Еще более желательно свести показания к непосредственному отсчету относительной влажности, то для этой цели (Л.) на рис. 377 помещен еще второй сухой (а вместе с влажным — третий) термометр, который, будучи соединен с остальными двумя в специальную схему двойного мостика с прибором со скрещенными рамками, указывает влажность до $t_l = 100°$. Аналогичные приборы изготовляются многими фирмами. При низких температурах, по Линевегу (Л). к воде можно прибавлять формальдегид, для того, чтобы кисейная оболочка не замерзала, вследствие чего, при длительном пользовании прекратилось бы дальнейшее всасывание кисеей; формальдегид, благодаря своей малой теплоте испарения, должен лишь незначительно изменять показания [1].

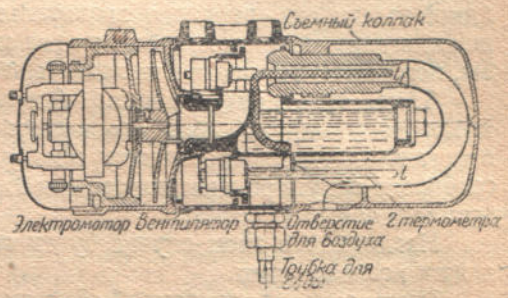



Рис. 377. Термоэлектрический психрометр с передачей на расстояние, $^1/_6$ натур. величины, фирмы «Сименс и Гальске».

В отношении *введения измерителей влажности в каналы*, находящиеся под *давлением ниже атмосферного*, сохраняет силу все сказанное относительно такого же введения термометров. Необходимо избегать, чтобы идущий внутрь в обратном направлении ток воздуха не попадал на шарики термометров и чтобы таким образом на термометрах не сказывалось более или менее влияние окружающей канал среды, Поэтому место введения термометра должно быть хорошо уплотнено. Аспирационный психрометр должен быть полностью подвешен в канале и отсчитываться в нем; при узких каналах (например, всасывающие рукава небольших холодильных установок) можно вделать в стенку канала стеклянное окошко, через которое и производить отсчет снаружи. Введение только трубок (*A* и *B* рис. 374) может быть достаточным только при *очень малом* отрицательном давлении, так как вентилятор развивает отрицательное давление только около 12 *мм*. Если всасывание в канале будет больше, то воздушный поток в трубке *C* изменяет свое направление на обратное, и мы будем исследовать наружный воздух. Но если этого даже и не будет, то скорость воздуха около шариков термометра уменьшится, поэтому уменьшится и конвекция. Впрочем, при измерениях в каналах вентиляционных и холодильных установок естественная конвекция, благодаря завихрениям в воздушном потоке, будет часто вполне достаточной, так что специальный вентилятор становится ненужным и необходимо только повесить в воздушном потоке два термометра.

**§ 133. Гигрометр.** Проще работает *волосяной гигрометр* (гигрометр Соссюра). Обезжиренный волос, как говорят, лучше всего волос блондинки, с одного конца укрепляется так, чтобы его можно было регулировать, а с другого — соединяется с указывающим устройством, пружинка которого держит волос слегка натянутым. Волос удлиняется при возрастающей влажности [2], и прибор указывает относительную влажность также и при изменяющейся температуре. Это явле-

[1] Здесь, конечно, играет роль не малая теплота испарения формальдегида, а тот факт, что сравнительно малое давление его паров, обусловливающее относительно малую его испаряемость, одновременно удачно компенсируется таким же малым понижением давления паров растворителя, т. е. воды. (*Прим. перев.*).

[2] Согласно Соссюру, изобретателю этого гигрометра, при возрастании влажности от 0 до 100%, волос удлиняется на $^1/_{48}$ своей длины. (*Прим. перев.*).

ние основано на том, что животные и растительные волокна воспринимают влагу подобно настоящим растворам и потому, подобно последним, имеют определенное давление пара, которое уравновешивается с давлением паров в воздухе; это имеет место (Л.) для шерсти, шелка, хлопчатой бумаги, а также для искусственного шелка; когда применяют женский волос, то здесь мы имеем волокно естественной длины.

Волосяной гигрометр обычно устраивается для непосредственного отсчета, однако его можно приспособить и как регистрирующий и для передачи на расстояние.

Волосяной гигрометр свободен от источника погрешностей психрометра при непрерывном употреблении, когда на кисее влажного термометра осаждается из воздуха пыль с растворимыми частичками, вследствие чего на нем испаряется уже не *дестиллированная* вода, и кривая давлений изменяется. Относительно величины этой погрешности (которую можно ограничить частой сменой кисеи) нет достаточных наблюдений. Однако, можно думать, что в воздухе с соляной пылью она, вероятно, значительна. С другой стороны, волосяным гигрометром иногда пренебрегают, несмотря на его простоту, а также из-за того, что он, якобы, показывает медленно и не захватывает достаточного объема воздуха помещения.

Такое сравнение, очевидно, неправильно; нельзя всасывающий психрометр, к которому окружающий его воздух подводится принудительно, сравнивать с предоставленным свободному обмену воздуха и к тому же, возможно, нецелесообразно закупоренным волосяным гигрометром; так сравнивать можно только аспирационный гигрометр.

Насколько в этом случае будет оказывать влияние отложение солей, подлежит исследованию.

Психрометр, поскольку обеспечена достаточная конвекция, показывает правильно сам по себе, волосяной же гигрометр требует *градуировки*; для такой градуировки можно получать воздух определенной степени влажности, пропуская его сквозь концентрированные растворы солей; $MgCl_2$ дает 43%, $NH_3Cl$ 65%, метафосфорная кислота 18—21%; можно получать непрерывно изменяющуюся от 1 до 96% влажность воздуха, пропуская его сквозь раствор серной кислоты, крепостью от 80 до 10%. Перед поверкой гигрометр должен находиться в насыщенном воздухе (под колпаком с мокрыми тряпками или под мокрым глиняным сосудом), что вообще может встретиться и при его эксплоатации (Л.).

**§ 134. Примеры. Тепловая производительность воздухоохладителя холодильной установки.** Из воздуха, как теплоносителя, тепло извлекается посредством змеевика, причем одновременно выделяется тепло через конденсацию. Подобные же расчеты и измерения производятся и при увлажнительных устройствах вентиляционных установок для жилых помещений и текстильных фабрик; только там идет вопрос не о конденсации, а об испарении.

В воздушном канале сечением 0,4 $м^2$, перед вентилятором, измерена скорость воздуха 11,7 *м/сек*. Циркулирующее количество воздуха будет $0{,}4 \cdot 11{,}7 \times 3600 = 16\,900$ $м^3/час$. При измерении температура воздуха была $+3°$ С, показание барометра 760 *мм*; циркулирующее количество, при нормальных условиях, будет $16\,700$ $м^3 \left(\frac{0}{760}\right)$ : *час*. Теплоемкость 1 $м^3 \left(\frac{0}{760}\right)$ воздуха будет 0,312; при низких температурах весовая часть пара столь мала, что ее влияние на общую удельную теплоемкость можно оставить без внимания. Воздух перед вентилятором имел 3,95°С, за воздухоохладителем — 1,38°С. В целом, аппарат, состоящий из вентилятора и воздухоохладителя, отнял 5,33° С, соответственно холодильной мощности (в виде охлаждения воздуха) $16\,700 \cdot 0{,}312 \cdot 5{,}33 = 27\,800$ *ккал/час*.

Влажность воздуха была измерена между вентилятором и воздухоохладителем. Температура воздуха, по отсчету по сухому термометру, составляла там 4,25° С (против 3,95° перед вентилятором). Отсчет по влажному термометру дал одновременно 2,65°, так что психрометрическая разность была 1,6°. Этому, по формуле (14), соответствует парциальное давление пара $p_d = 5{,}56 - 0{,}5 \times 1{,}6 = 4{,}8$ *мм* Hg, где 5,56 *мм* Hg есть давление насыщенного пара при 2,65°. Давление насыщенного пара при 4,25° равно 6,21 *мм* Hg, откуда получается от-

носительная влажность в 77%. Содержание насыщенного пара при 4,25° равно 6,48 *г/м³*, содержание пара в исследуемом воздухе, следовательно, 0,77 · 6,48 = = 4,97 *г/м³*.

Чтобы определить содержание пара в общей массе воздуха, сперва нужно из его объема при 0° вычислить объем при 4,25°. Он равен 16 950 *м³*.

Содержание водяного пара в общей массе воздуха при его входе в воздухоохладитель (или при входе в вентилятор, в котором вместе с температурой изменилась относительная влажность, но не абсолютное содержание пара) будет таким образом 16 950 · 0,00497 = 84,2 *кг/час*.

Этому количеству влаги, вошедшей в воздухоохладитель, надо противопоставить количество из него вышедшее. При выходе была измерена температура — 1,38°; психрометрическая разность не была обнаружена; состояние насыщения не обязательно должно господствовать после воздухоохладителя, тем более необязательно, если воздухоохладитель работает по принципу орошения рассолом; однако в данном случае такое насыщение имело место. Объем воздуха при — 1,38° равен 16 550 *м³/час*, количество насыщенного пара при этой температуре есть 0,00409 *г/м³*. Общее содержание пара при выходе таким образом 16 550 · 0,00409 = 67,7 *кг/час*.

Если в воздухоохладитель вошло 84,2 *кг/час* пара, а вышло 67,7 *кг/час*, то 16,5 *кг* влаги сконденсировалось. Теплоту конденсации можно принять в 600 *ккал*. Это число является приблизительно подходящим, так как теплосодержание пара при 0° (по сравнению с водой при 0°) составляет 595 *ккал*. Поэтому на конденсацию влаги падает 16,5 · 600 = 9900 *ккал/час*.

Общая нагрузка воздухоохладителя для охлаждения этого количества воздуха составляет 27 800 + 9900 = 37 700 *ккал/час*. Таким образом, часть нагрузки, приходящаяся на долю конденсации, составляет 26% и ею ни в коем случае нельзя пренебрегать.

Быстрее можно прийти к цели, пользуясь теплосодержаниями по рис. 372. Начальная точка на диаграмме отмечена там крестиком. Мы получаем:

| | |
|---|---|
| для воздуха при $t = 4{,}25°$, $t - t_f = 1{,}6°$ | $i = 3{,}40$ |
| для воздуха при $t = 1{,}38°$, $t - t_f = 0$ | $i = 1{,}63$ |
| холодильная мощность составляет | $\Delta i = 1{,}77$ *ккал* |

по отношению к 1 *кг* циркулирующего воздуха. Так как количество циркулирующего воздуха составляет 16 700 · 1,293 = 21 600 *кг/час*, то мощность холодильной установки 21 600 · 1,77 = 38 200 *ккал/час*. Полученное число несколько больше, чем полученное раньше; причиной может быть, то, что принимая число 1,293 *кг/м³* за плотность воздуха при 0° и 760 *мм* Hg, мы пренебрегали парциальным давлением водяных паров. Точнее будет следующий расчет. Так как при 4,25° относительная влажность была 0,77, согласно рис. 372, то парциальное давление пара было 0,77 · 6,21 = 4,8 *мм* Hg, а давление воздуха следовательно только 755 *мм* Hg. Масса воздуха, следовательно, была в $\frac{755}{760}$ раз меньше, чем принято выше, т. е. была равна $21\,600 \cdot \frac{755}{760} = 21\,450$ *кг/час*, а мощность холодильника 21 450 · 1,77 = 38 000 *ккал/час*, опять-таки несколько больше, чем при другом ходе расчета. При более высоких температурах пренебрегать парциальным давлением пара совершенно недопустимо.

Измерение было произведено, как и в последнем примере предыдущих параграфов, при установившемся состоянии. Как и в упомянутом примере, необходимо еще внести поправки, если омываемые протекающим воздухом части не находились при одинаковой температуре в начале и в конце испытания, так что на данное испытание накладывается еще испытание на охлаждение, в положительном или отрицательном смысле.

Только условно правильным будет, если за понижение температуры в расчет будет принято понижение всего аппарата, состоящего из вентилятора и охладителя, для чего последовательно будет введено в расчет как нагревание в вентиляторе, так и охлаждение в воздухоохладителе. Это будет правильно лишь тогда, когда речь идет об испытании всего агрегата в целом, а не только одного охладителя.

Измерение вышеописанного рода таит в себе значительные *источники погрешностей*. Уже измерение количеств воздуха бывает неточным; измерение влажности является измерением по разности, так как наблюдается разность показаний двух термометров; если 1,6° психрометрической разности будут определены с точностью до 0,1°, то погрешность будет уже значительной; затем расчет сконденсированной влаги опять производится как разность между поступившей и вышедшей.

В *сушильных установках* подобным же образом можно определить влажность отходящего воздуха. Если сухой термометр показывает 70,3° С, а влажный остановился на 55,2°, то $t - t_f = 15{,}1°$; в данном случае конвекция достаточна, чтобы принять фактор доброкачественности, согласно таблице 29, равным $a = 0{,}95$. Тогда теоретическая разность $\Delta = 15{,}1/0{,}95 = 15{,}9°$, чему, согласно рис. 373, при $t = 70°$ соответствует относительная влажность 0,47 или 47%. Теплосодержание $i = 80$ *ккал/кг* воздуха. Отсюда можно вычислить остальное.

**§ 135. Определение количества тепла из количества пара.** Если носителем измеряемых количеств тепла является пар, то вычисление ведется по теплосодержаниям. Последние нельзя больше исчислять по удельной теплоемкости, так как кроме нее в расчет входит еще скрытая теплота парообразования, а также потому что область пара, как лежащая вблизи точки насыщения, представляет большие аномалии удельной теплоемкости. Теплосодержания паров берутся по таблицам или из формул, или наконец по графическим таблицам; последние кроме того дают в форме *is*-диаграммы также и энтропию, которая, в данном случае, нас сейчас не интересует.

Чтобы, например, найти теплосодержание водяного пара при 10,25 *ат* абсолютного давления и 303° С температуры, мы имеем в распоряжении следующие средства.:

1. В Hütte имеется таблица, по которой мы интерполируем:

при 300° С при 10 *ат*: $i = 729{,}9$; при 12 *ат*: $i = 728{,}7$.

Разность 1,2, отсюда $^1/_8 = 0{,}15$.

поэтому при 10,25 *ат*: $i = 729{,}9 - 0{,}15 = 729{,}75$.

При 350° С при 10 *ат*: $i = 754{,}9$; при 12 *ат*: $i = 754{,}0$,

поэтому при 10,25 *ат*: $i = 754{,}9 - 0{,}11 = 754{,}8$

Разность на 50° = 25,05

Искомое теплосодержание $i_{303;\ 10{,}25} = 729{,}75 + 0{,}15 = 729{,}9$ *ккал/кг*.

2. Молье дает эмпирическую формулу:

$$i = 0{,}47\,t - J_1 \cdot p - J_2 \cdot (p/100^3) + 595.$$

Здесь должно быть $J_1 = \dfrac{202{,}96}{(T/100)^{10/3}}$;

$$J_2 = \frac{2{,}2248 \cdot 10^{12}}{(T/100)^{14}};$$

вспомогательная таблица для интерполяции дает непосредственно для 303° С: $J_1 = 0{,}593$; $J_2 = 50{,}6$; искомое теплосодержание:

$$i = 0{,}47 \times 0{,}303 - 0{,}593 \cdot 10{,}25 - 50{,}6 \cdot 0{,}00108 + 595 =$$
$$= 142{,}4 - 6{,}08 - 0{,}055 + 595 = 731{,}3 \text{ ккал/кг}.$$

3. По *is*-диаграмме по Кноблауху (1932) находим для 303° и 10,25 *ат* непосредственно: $i = 730$ *ккал/кг*.

Пример. Паровой котел в течение 8 часов питался водой при температуре в среднем 52° и доставлял пар 10,25 *ат* абсолютных и температуры 303°. Как вычислено выше, теплосодержание такого пара $i = 730$ *ккал/кг*. Отсюда следует вычесть теплосодержание питательной воды в 52 *ккал/кг*; таким образом получается затраченная теплота 730—52 = 678 *ккал/кг*. Если за 8 часов испытания было подано 17 160 *кг* питательной воды и были приняты меры, чтобы уровень воды в котле как при начале, так и в конце испытания был одинаков (чтобы исключить неточности в этом отношении, взято длинное время испытания), то ежечасно испарялось: 17 160 : 8 = 2145 *кг* и было полезно затрачено 2145 · 678 = 1 455 000 *ккал/час* (относительно необходимого для испытания времени сравн. «Испытание машин» § 29).

И в тех случаях, когда нас интересует не теплосодержание пара само по себе, а должно быть измерено поглощение тепла какой-нибудь средой, такое измерение можно также свести к измерению количеств пара. Таким образом при паровом отоплении *теплопередача нагревателей* может быть определена посредством взвешивания полученного конденсата и умножением на разность между теплосодержаниями поступающего пара и отходящего конденсата. При менее точных измерениях эту разность часто просто принимают равной 600 *ккал/кг* как, например, при определении теплотворной способности в § 140 и 142, где вопрос идет лишь об определении поправки. Точно так же можно определять *холодильную мощность холодильной машины*, помещая обогреваемый паром змеевик в рассол и подводя пар как раз в таком количестве, чтобы подвод тепла паром постоянно уравновешивался поглощением тепла машиной, так чтобы температура рассола ни подымалась, ни падала. Затем измеряется количество конденсата. Можно посоветовать во всех случаях, когда желательна точность в измерениях, слегка перегревать поступающий пар, так как иначе нельзя достоверно знать, сколько влаги несет пар с собой.

Именно всегда, когда температура пара не превосходит соответствующей давлению температуры насыщения, пар может быть как сухим, насыщенным, так и содержать любые количества влажности. Так как теплосодержание воды составляет только от $^1/_4$ до $^1/_6$ теплосодержания пара, то содержание влажности обусловливает значительное уменьшение теплосодержания пара. Таким образом, при производстве насыщенного пара котлом, а также при применении насыщенного пара для измерения количеств тепла, как, например, в нагревателях и в холодильных машинах, определение степени влажности пара является необходимым.

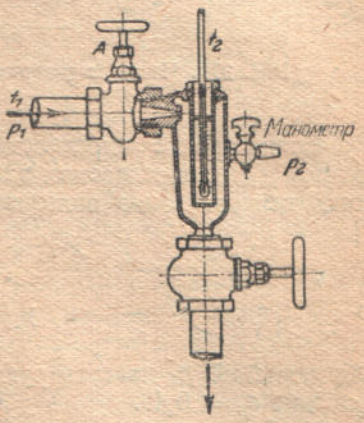


Рис. 378. Дроссельный калориметр.

**§ 136. Определение влажности пара.** Влажность пара измеряется посредством *дроссельного калориметра*. Этот калориметр состоит из полого сосуда, стенки которого защищены от излучения соответствующей изоляцией. Эта изоляция на рисунке не изображена; она должна иметь возможно малую массу. В этот сосуд поступает влажный пар, давление или температура которого предварительно определяются (обе эти величины зависят друг от друга). Так как теплосодержание насыщенного пара при низком давлении несколько меньше, чем при более высоком, то освободившееся тепло несколько перегревает пар, но только после того, как последний будет сперва высушен. Чем влажнее, следовательно, был пар, тем меньше он будет перегрет при дросселировании. Если измерить температуру пара и его давление в калориметре при $p_2$ и $t_2$, то по его перегреву можно судить о его первоначальной влажности. Внизу пар вытекает наружу. При измерении прибор должен находиться в установившемся состоянии и в особенности изоляция должна быть хорошо прогрета.

Дросселирование есть необратимый процесс при неменяющемся теплосодержании и возрастающей энтропии; на *is*-диаграмме он изображается горизонтальной прямой, праволежащую конечную точку которой ($p_2$, $t_2$) мы знаем, а начало получается как точка пересечения горизонтальной с подымающейся линией $p_1$; линии постоянной влажности нанесены на *is*-диаграмме и позволяют найти соответствующее $p_1$ содержание влаги $x_1$.

В качестве примера может служить изображенная на рис. 379 часть *is*-диаграммы. Пар избыточного давления 10,7 *ат* был калориметрирован и показал в дроссельном калориметре при избыточном давлении в 350 *мм* Hg = 0,476 *ат*, температуру в 136,2°. Показание манометра 740 *мм* = 1,01 *ат*. При дросселировании получается пар 1,49 *ат* и 136,2°, на диаграмме точка *B*; горизонтальная прямая налево дает при 11,7 *ат* точку *A*, соответственно содержанию пара $x = 0{,}98$ или влажности $y = 2\%$.

Путем расчета получается следующее: давлению 1,49 *ат* соответствует теплосодержание насыщенного пара (интерполируя между 642,8 и 643,6 при 1,4 и 1,5 *ат*) $\lambda = 643,5$ и температура насыщения (интерполируя между 108,7 и 110,8) $t = 110,6°$. Следовательно, пар после дросселирования был перегрет на $136,2—110,6° = 25,6°$. Его удельная теплоемкость на пограничной линии будет 0,487 и 0,501 при 1 и 2 *ат* абсолютных (Шюле. «Термодинамика», 3 изд., т. 1, стр. 200) и при этих малых давлениях протекает так равномерно, что ее свободно можно принять $c_p = 0,49$. Пар после дросселирования имеет теплосодержание $i = 643,5 + 0,49 \cdot 25,6 = 656,0$ *ккал/кг*.

Такое же теплосодержание имел первоначальный пар при 11,7 *ат*, при таком давлении теплосодержание сухого насыщенного пара (при 185,9°) $\lambda = 665,7$; следовательно, испытуемый пар был влажным. Соответствующее теплосодержание $q$ жидкости при той же температуре равно 188,6 *ккал/кг*. Если 1 *кг* испытуемого пара содержал $x$ *кг* пара и $y$ *кг* влаги, то можно написать $x \cdot 665,7 + y \cdot 188,6 = 656,0$; откуда $y = 0,0206$, как и раньше.

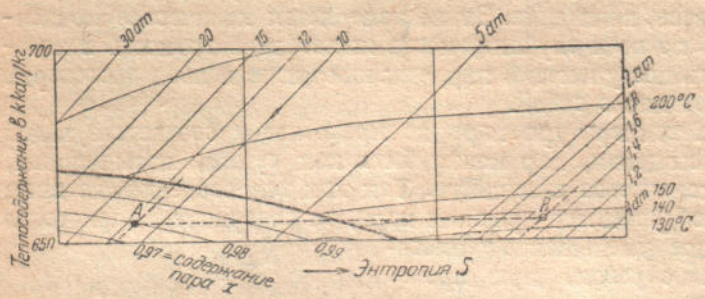



Рис. 379. Часть *is*-диаграммы для водяного пара.

Если прочие определения производятся при помощи *is*-таблиц, то они годятся и для определения влажности; при специальных исследованиях на влажность целесообразно пользоваться вычислением по следующей формуле:

$$x \cdot \lambda_1 + y \cdot q_1 = \lambda_2 + 0,49\ (t_2 - t_{s2}),$$

$$y = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2) - 0,49 \cdot (t_2 - t_{s2})}{\lambda_1 - q_1}; \qquad (15)$$

для давлений $p_2$ дросселируемого пара от 1 до 2 *ат* абсол. можно принимать значение $c_p = 0,49$.

Чтобы определить влажность *пара при атмосферном давлении*, его приходится дросселировать в вакуум, который можно получить при помощи водоструйного насоса. Измерение и расчет остаются в остальном одинаковыми. Только при низких температурах выражение $\lambda_2 — c_p \cdot t_{s2}$ оказывается вплоть до 80° весьма постоянным, именно равным 593, 5 *ккал/кг*, так как и $\lambda_1 = 639$ *ккал* и $\lambda_1 — q_1 = r_1 = 540$ *ккал* остаются неизменными, то (например при испытаниях центрального парового отопления низкого давления) $y\% = 8,43 — 0,089\ t_2$ является для таких случаев очень удобной формулой; здесь, для низких давлений, принято $c_p = 0,48$.

Внешняя форма дроссельного калориметра несущественна, его легко можно самому устроить из отрезка газовой трубы. По Зендтнеру (Л.) полезно хорошее завихрение пара между дроссельным устройством и термометром, хотя бы при помощи вставленной спирали из жести и сита. Следует заботиться о хорошей тепловой изоляции. Вентиль *A* должен быть вполне открыт; для дросселирования достаточно сопла. Чем больше рабочее количество пара, тем меньше влияние потерь на излучение.

Дроссельный калориметр применим лишь для умеренных степеней влажности, примерно до 2—4%. Очень влажный пар уже не перегревается. Но так как перед каждой машиной в паропровод обыкновеннно включается сухопарник, то исследуемый пар не должен быть слишком влажным. Если же желательно исследовать, насколько влажен производимый котлом пар (при выходе из него), то иногда дроссельный калориметр оказывается недостаточным. Если мы отсчитываем на калориметре температуру насыщенного пара, то нельзя сделать никакого заключения.

Для таких случаев может служить предложенный Карпентером *отделяющий* (или улавливающий) калориметр. В нем влага отделяется от пара механически и непосредственно измеряется (рисунок и описание приведены в 1 и 2 издании этой книги, также Л.). Осушку пара отделяющим калориметром нельзя считать полной и после него следует включать еще дроссельный калориметр. Таким образом, оба калориметра взаимно дополняют друг друга.

*Другие методы* основываются, например на том, что к влажному пару подводят тепло, выделяемое электрическим током в сопротивлении, введенном в пар. Пар высушивается и затем несколько перегревается; подведенная электрическая энергия перечисляется в тепловую из расчета 1 *квт час* = 860 *ккал*. Можно также сконденсировать пар и, таким образом, определить его теплосодержание калориметрически (Л.).

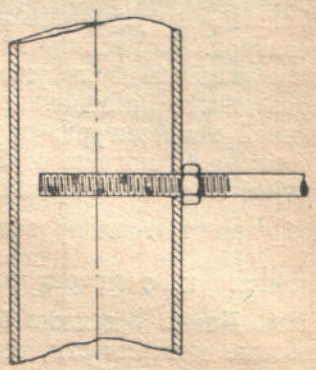


Рис. 380. Отбор пробы пара.

Однако, редко возможно подвергнуть испытанию на влажность все количество пара в целом. Обыкновенно в калориметре испытывается небольшой ответвленный поток. Калориметр может в лучшем случае правильно определить только попавшую в него пробу; поэтому важным является способ *отбора пробы* (рис. 380). Заборная трубка вводится поперек паропроводной трубы и снабжена отверстиями; на конце она закрыта. Предполагается, что если пар распределяется в трубе равномерно концентрическими слоями, то от каждого слоя мы также получим поровну. Так как при горизонтальных трубах вода течет по дну вдоль трубы, то заборные штуцера необходимо устанавливать в вертикальных трубах, в которых, кроме того, пар должен итти снизу вверх. Во всяком случае трубка, ведущая к калориметру, должна быть хорошо изолирована, иначе пар еще будет терять теплоту. Несмотря на все, пробы часто отклоняются от среднего значения.

**§ 137. Измерение тепловых потерь.** Тепловыми потерями называют уходящие количества тепла тогда, когда мы хотим сделать их возможно малыми. Нагреватель же выполняет свою задачу тем лучше, чем больше тепла он теряет,— его отдача является, следовательно, полезным теплом. Этим объясняются технические трудности таких измерений: если потери малы, то теплосодержание будет только немного изменено потерями и измерение теплосодержаний или температур, с целью получить их разницу, будет в отношении искомой величины типичным диференциальным методом и потому (§ 59) неточно. Поэтому потери следует измерять не как разницу, а непосредственно.

*С потерями холода* (необходимо обращать внимание на их знак) следует поступать точно так же; но так как холод во много раз дороже тепла, то потери в денежном выражении будут более чувствительны. В дальнейшем мы будем включать их в понятие тепловых потерь.

Всякого рода постройки в связи с тепловыми потерями необходимо отапливать или охлаждать. Так называемый *расчет тепловых потерь* устанавливает требуемую поверхность нагрева. В этих случаях дело идет, следовательно, о теплопроводности строительных материалов и построенных из них частей зданий.

При трубопроводах для передачи горячего (или холодного) теплоносителя тепловые потери вызывают потери энергии, которые стараются возможно ограничить *изоляцией* трубопроводов. Желательно знать теплопроводность теплоизоляционных материалов и целых построеных из них теплоизоляционных устройств. Особо тщательные теплоизоляционные устройства осуществляются в холодильниках или при машинных установках (обмуровка котлов, изоляция тепловых машин).

В обоих случаях речь идет или об испытаниях строительных материалов, или об испытании готовых построек. Первые можно производить в лаборатории, тогда как последние приходится производить на месте.

Исследуемые материалы характеризуются *коэфициентом теплопроводности* $\gamma$, который измеряется тепловым потоком в *ккал/час*, проходящим через

1 $м^2$ плоско параллельной стены, когда падение температуры равно 1° С/*м* при отсутствии боковых потерь; размерность $\lambda$ $\frac{ккал}{час \cdot м^2\ град/м} = \frac{ккал}{час \cdot м.\ град}$ (§ 3). Коэфициент теплопроводности сильно возрастает с температурой, поэтому следует указывать температуру, о которой идет речь. Для определения $\lambda$ в лабораториях имеются приборы, которые по своей конструкции имеют назначение исследовать порошкообразные или нанесенные в виде штукатурки материалы или доставленные в виде пластин или фасонных частей. В принципе всегда имеется геометрически хорошо определимое тело — шар, куб или цилиндр, — окруженное испытуемым материалом и обогреваемое электричеством таким образом, что установившееся состояние наступает при желаемой средней температуре. По расходу энергии $Q$ для поддержания установившегося состояния и по размерам изолирующего слоя можно вычислить средний коэфициент теплопроводности примененного материала. Чтобы приурочить последний к определенной температуре, определяют посредством закладываемых термопар температуру $t_1$, нагреваемой стенки и температуру $t_2$ наружной поверхности изоляции. Например, при покрывающей трубу изоляции, имеющей радиусы $R$ и $r$, коэфициент теплопроводности $\lambda = \frac{Q}{2\pi \cdot l(t_1 - t_2)} \cdot \ln (R/r)$ и это значение относится к температуре $t_m = \frac{1}{2}(t_1 + t_2)$, если $\lambda$ зависит *линейно* от температуры. Длина $l$ должна быть достаточно велика, чтобы отдача тепла через лобовые поверхности, которую приходится при измерении учитывать, имела величину простой поправки.

*Испытуемые части строения* характеризуются проходящим через них в час потоком тепла под влиянием перепада температуры $t_i - t_a = \Delta t$. Речь идет о количестве тепла, проходящего через 1 $м^2$ стенки определенной конструкции или также теряемым 1 погонным метром изолированного трубопровода. Размерность этого потока — *ккал/м². час*, а при трубопроводе — *ккал/м·час*. Потери можно также относить к 1° С, но часто их требуется определять непосредственно для предписанных температур $t_i$ и $t_a$. В других случаях речь идет об общей потере какой-либо определенной строительной части, иногда помещения, окна, вентиля. Размерность потока здесь — *ккал/час*, определенная для температурного перепада от $t_i$ к $t_a$.

Для таких определений служит *метод добавочного слоя* Генки (Л.). Перед исследуемой частью устанавливается стенка, проводимость которой для тепла, в зависимости от температур по ее обеим сторонам, является известной; наблюдают установившиеся по обеим сторонам температуры и отсюда вычисляют тепловой поток сквозь нее. Если никакое количество тепла не будет уходить между стенками или через стенку в стороны, то тот же тепловой поток будет проходить через испытуемую стенку. Испытания должны вестись так, чтобы с обеих сторон господствовали требуемые температуры.

*Метод добавочного слоя* (или добавочной стенки) использованы Е. Шмидтом и Генки для построения *измерителя теплового потока*, служащего именно для испытаний термоизоляции трубопроводов (Л.). Резиновая лента, примерно, 2 *мм* толщиной, 60 *мм* шириной и 630 *мм* длиной, навивается на трубу. В нее заделаны два ряда термопар по 100 спаев, завулканизированных в ее толще — один наружу, другие внутрь, — соединенных последовательно, так, что под действием теплового потока эти термопары развивают напряжение в сто раз больше, чем одна термопара. Это напряжение отсчитывается на милливольтметре, шкала которого отградуирована на тепловые потери — $q_e$ в *ккал/м²час*, причем $q_e$ относится к измерению на плоской стенке. На такой же стенке и градуируется прибор, так как невозможно изготовить ленту взаимозаменяемой. Если $s$ *м* есть толщина испытуемой стенки, $t_{01}$ и $t_{02}$ — температуры обеих ее поверхностей, то

$$\frac{\lambda \cdot (t_{01} - t_{02})}{s} = q_e; \qquad \lambda = \frac{q_e s}{t_{01} - t_{02}}.$$

Для цилиндрических поверхностей

$$\lambda = \frac{q_e \cdot s}{t_{01} - t_{02}} \cdot f_w \cdot \varphi \frac{d_2}{\frac{1}{2}(d_1 + d_2)}. \tag{16}$$

Здесь

$$f_w = \frac{2s_H}{d_2 \cdot \ln \frac{d_2 + 2s_H}{d_2}}.$$

Эта формула вводит в расчет кривизну ленты, а последняя дробь формулы (16) — кривизну исследуемого слоя; $s_H$ есть толщина вспомогательного слоя (ленты). Утечка тепла на сторону предотвращается тем, что на ленте собственно термобатарея занимает только около 100 *мм* в длину, остальная часть ленты ограждает измерительную поверхность; сверх того рядом с измерительной лентой укладываются две однородные с ней защитные полосы, но без термопар; таким образом, место измерения полностью защищено.

Температура $t_{02}$ наружного слоя может быть измерена на поверхности ленты, где слои термопар находятся на поверхности. Имеющаяся конвекция, благодаря токам воздуха, влияет на температуру этих слоев и заставляет указатель гальванометра заметно колебаться. Поэтому берут среднее значение, однако, если колебания делаются слишком большими, то это становится затруднительным.

Поверхности изоляции на производстве подвержены такому же влиянию конвекции. Однако, при плохих проводниках тепла кратковременные колебания проникают вглубь лишь на доли миллиметра и при толщине изоляции от 20 до 100 *мм* они не имеют никакого значения; для ленты же их влияние весьма заметно. Лента, таким образом, усиливает колебания.

Если колебания становятся обременительными, то лента снабжается успокоителем, например, жестяным экраном, задерживающим воздушные токи и, прежде всего, солнечное излучение; или накладывают изолирующий слой резины или войлока на ленту, причем в последнем случае приходится дольше ждать, пока наступит установившееся состояние и позволит произвести измерение.

Мы ограничиваемся этими замечаниями, так как «Правила для испытания тепловых и холодильных установок» (Л.) исчерпывающе описывают эту область. Добавим лишь следующее.

Методом добавочного слоя, а, следовательно, и измерителями теплового потока измеряется по формуле (16) коэфициент теплопроводности исследуемой стенки; при стенке же, составленной из отдельных слоев — «эквивалентный» средний коэфициент теплопроводности. Однако, наложением вспомогательного слоя тепловой поток сквозь исследуемую стенку оказывается искаженным, поэтому *эксплоатационные* тепловые потери *нельзя* принимать равными потоку, проходящему через вспомогательный слой, и их следует подсчитать по обычным формулам; для этих подсчетов испытания с помощью вспомогательного слоя создают надежное основание.

---

# XII. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

**§ 138. Единицы.** Для твердых горючих (уголь) теплотворная способность обыкновенно определяется при помощи бомбы, для жидких и газообразных — бензина или керосина, светильного или генераторного газа и т. п. — обыкновенно при помощи калориметра Юнкерса.

Теплотворная способность есть количество тепла, которое освобождает единица горючего материала при полном сгорании составных частей и последующего охлаждения до температуры окружающей среды. Теплотворная способность не зависит от того, происходит ли сгорание в воздухе или в чистом кислороде, или от того, находится ли кислород в достаточном для сгорания количестве, или имеется в избытке, а также практически не зависит от давления, при котором происходит горение (если только не происходит образования CO и других горючих составных частей или несгоревших остатков тяжелых углеводородов, как следствие неблагоприятных условий сгорания). Все эти обстоятельства влияют лишь на скорость горения и наступающее повышение температуры.

Теплотворная способность твердых и жидких тел относится к одному килограмму — газообразных к кубическому метру — естественно к приведенному объему. Поэтому величины теплотворной способности имеют наименования *ккал/кг* и *ккал/м*³ $\left(\frac{0}{760}\right)$. Работы по физической химии дают большей частью теплотворную способность в грамм-калориях (1 *кал* = 0,001 *ккал*), притом отнесенную к грамм-молекуле, следовательно, к числу граммов, отвечающему молекулярному весу вещества. Таким образом, теплотворная способность (высшая) метана $CH_4$ равна 213,5 *ккал/моль*. Молекулярный вес метана $12 + 4 \cdot 1{,}008 = 16{,}03$, его теплотворная способность, выраженная в технических единицах, будет $\frac{213{,}5}{16{,}03} \cdot 1000 = 13\,320$ *ккал/кг*; или, согласно плотности метана в 0,716 *кг/м*³ $\left(\frac{0}{760}\right)$, теплотворная способность выразится $13\,320 \cdot 0{,}716 = 9540$ *ккал/м*³ $\left(\frac{0}{760}\right)$.

**§ 139. Максимальная и минимальная теплотворная способность.** Горючие материалы, с которыми приходится иметь дело в теплотехнике, состоят из углерода C, водорода H и кислорода O в их различных соединениях между собою; они большей частью содержат еще от 1 до 2% серы. Кроме того они большей частью содержат воду, которая при твердых и жидких горючих материалах вступает в процесс в конденсированном виде, в газообразных же присутствует в виде пара. Дальше и подводимый для горения воздух вводит в процесс воду в виде пара. При полном сгорании образуется углекислота $CO_2$ и вода $H_2O$. Тогда как углекислота всегда уходит в газообразном виде, вода может составлять пространство сгорания или в виде водяного пара, или в жидком виде; это зависит от конечной температуры отходящих газов.

В зависимости же от того, остается ли вода (частично имеющаяся в наличии в горючем, частично образовавшаяся при горении) в парообразном состоянии или конденсируется в жидкость, освобождаются различные количества тепла. Отходящий водяной пар уносит с собой скрытую теплоту испарения при 20° C, в количестве 585 *ккал* на 1 *кг* пара, которые выделяются, если водяной пар конденсируется. Количества тепла, освободившиеся в процессе сгорания и измерен-

ные калориметрически, будут следовательно меньше, если вода уходит в виде пара, и больше, если она имеет возможность сконденсироваться.

К водяному *пару*, как продукту сгорания, относится *низшая теплотворная способность*. Результат, отнесенный к воде, в качестве конечного продукта, дает *высшую теплотворную способность*. Обе величины различаются на число (равное 600), умноженное на количество воды в продуктах сгорания. Высшая теплотворная способность обозначается так же как *теплота сгорания*, тогда низшая — должна бы называться просто *теплотворной способностью*; мы пока не следуем этому предложению; основания будут указаны в конце параграфа.

Соответственно предписаниям и нормам Союза немецких инженеров в Германии следует для расчетов пользоваться, как руководящими, низшими теплотворными способностями, в Америке же для этого принимают высшие.

Разница между обоими способами значительна: значения для каменного угля будут соответственно 7500 и 7200 *ккал*, для бурых углей — 4500 и 4200, для керосина — 10 500 и 9750 и для светильного газа 5400 и 4800 *ккал*. Разница будет тем больше, чем больше процентное содержание водорода в горючем материале.

Если вести расчет по низшей теплотворной способности, то коэфициент полезного действия топки, снабжаемого соответствующим топливом, или питаемой им машины, будет выше, чем в том случае, если расчеты ведут по высшей теплотворной способности. За счет чего разница между высшей и низшей теплотворной способностью практически не была использована — за счет топлива или машины и топки (Л.)?

Прежде всего может быть оправдано принятие низшей теплотворной способности при использовании горючего для *непосредственного получения работы* в двигателях внутреннего сгорания. Согласно второму принципу термодинамики теплота никогда не может быть превращена в работу целиком, но только частью. Эта часть будет тем меньше, чем ниже температура рабочего процесса. Сгорание в двигателях внутреннего сгорания происходит при температурах выше 1000°, и тепло освобождается при этих высоких температурах. Теплота же, могущая быть полученной от конденсации водяных паров, всегда освобождается лишь при низких температурах. *Работоспособность* того количества тепла, которое соответствует разнице между высшей и низшей теплотворной способностью, является поэтому значительно меньшей, чем работоспособность, соответствующая низшей теплотворной способности; эта разница представляет малоценное количество тепла. Пусть диаграмма газомотора так построена и теплотворная способность газа такова, что от точки *A* температуры и парциальные давления пара принимают такие значения, при которых наступает конденсация. По диаграмме видно, как мало приращение площади диаграммы, которое можно ожидать от освобождения скрытой теплоты испарения, особенно, если она всегда освобождается только ниже *A*; выигрывается при этом только маленькая площадь *1*, тогда как такое же приращение количества теплоты, которое получается при *B* от повышения температуры, вследствие повышения *низшей* теплотворной способности, дает прирост на площадь, обведенную пунктиром. Эти теоретические соображения подтверждаются практикой так, что при конструировании двигателя никогда не доходят до границы, где начинается конденсация.

При использовании же теплоты для отопительных целей всякая теплота равноценна, независимо от того, освобождается ли она при высокой или при низкой температуре — всегда впрочем при одном условии, что теплота переходит с теплоносителя на нагреваемое тело, но не наоборот. Для нагревания парового котла, вода которого находится при 180°, разница между высшей и низшей теплотворной способностью (которая в этом случае получается только ниже 100°) опять не может быть использована, по крайней мере непосредственно. При ее помощи, однако, можно подогреть холодную питательную воду и таким образом использовать ее в котле. Поэтому можно сказать, что причина неиспользования лежит не в топливе, если не приняты меры к полному использованию теплоты.

Однако, горючее отдает эту разницу лишь тогда, когда подводимый для горения воздух уже был вполне насыщен влагой; при газообразном топливе необходимо также насыщение самого газа. При всяких других обстоятельствах эта разница или вовсе не может быть отдана или отдана только частично. Из дымовых газов влага осаждается даже при полном охлаждении лишь тогда, когда достигнуто насыщение всего объема водяным паром. Объем отходящих газов только при угле мало отличается от объема подведенного воздуха. При светильном газе он почти не отличается от суммы объемов, которые вместе занимали до этого газ и воздух. Если продукты сгорания отходят с температурой, при которой поступал воздух или соответственно газ и воздух, то для их насыщения требуется столько же влаги, как и для насыщения последних; если последние были подведены насыщенными, то вся образовавшаяся при сгорании вода должна сконденсироваться. В противном случае, вода от сгорания отойдет в виде пара с продуктами сгорания, — какая часть —это зависит от содержания водорода в горючем и от подведенного количества воздуха, а это может изменяться в широких пределах. Практически, при каменном и буром угле выпадает около половины воды сгорания; если воздух подводится сухим, избытка воздуха не дают и использование доводится до 20°.

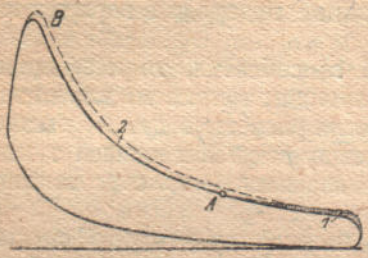


Рис. 381. Наглядное представление малоценности скрытой теплоты парообразования (по Э. Мейеру).

Таким образом, можно полностью использовать высшую теплотворную способность, если подводить воздух вполне насыщенным и делать поверхность нагрева такой большой, чтобы горючие газы могли быть охлаждены до окружающей температуры. Для выполнения этих двух требований нет никаких теоретических возражений и при некоторых обстоятельствах они также выполнимы и практически. Поэтому, не будет последовательно при процессах сгорания рассматривать как потери с отходящими газами лишь то тепло, которое отвечает только теплоемкости дымовых газов; скрытая теплота водяных паров должна быть учтена также, поскольку дело не идет о прямом производстве работы.

В этом случае следует рассматривать, как решающую, высшую теплотворную способность, при применении которой ценность топлива оказывается выше, а коэфициент полезного действия ниже.

Поэтому высшая теплотворная способность должна быть решающей тогда, если речь идет о *нагревательной* способности; низшая же теплотворная способность должна рассматриваться, как энергетическая ценность топлива.

Подобному различию мешает то, что в правилах везде предписано применять низшую теплотворную способность — в противоположность США, где обычно применяется высшая теплотворная способность. Насколько ошибочным может быть наше привычное употребление, ясно из того, что в известных газовых ванных печах почти полностью используется высшая теплотворная способность; пользуясь нашими правилами, легко можно получить коэфициент полезного действия выше единицы для ванных печей.

Принципиальные соотношения, касающиеся теплотворных способностей, рассматривает Меркель (Л.). Прежде всего, калориметры не дают ни низшей, ни высшей теплотворной способности, но некоторую лежащую между ними, более близкую к высшей, которую в США не без основания обозначают как *калориметрическую* теплотворную способность (Л.).

**§ 140. Твердое топливо.** Теплотворная способность твердых горючих материалов определяется при помощи *калориметрической бомбы*. Целесообразной является такая форма бомбы, которая допускает последующее исследование продуктов сгорания на содержание воды, как, например, изображенная на рис. 382. Она состоит из корпуса с отвинчивающейся крышкой, эмалированного внутри, а еще лучше изготовленного из специальной нержавеющей стали. Крышка снабжена двумя отверстиями, которые могут замыкаться посредством двух маленьких вентилей, открывающихся, как указано на рис. 382 (при *a*

и $b$), где можно привинтить трубочки для введения кислорода, необходимого для сжигания, а затем для вывода продуктов сгорания. В прочее время эти отверстия закрываются маленькими винтовыми пробками для предохранения от пыли. Платиновая трубка $c$ позволяет продувать кислород через всю бомбу, а маленький, укрепленный в ней, платиновый тигель предохраняет от разбрасывания расплавленных шлаков, которые могут повредить эмалировку (сгорание в сжатом кислороде происходит бурно). Одновременно трубка образует один полюс при электрическом зажигании; другой полюс $d$ проходит через крышку, изолированный от нее. Погруженная в навеску железная проволочка своими концами обматывается около обоих полюсов. Будучи накалена, она зажигает навеску угля, после того как в бомбе будет накачан кислород под давлением около 20 *ат*.

При зажигании бомба помещается в калориметр (рис. 383). Калориметр представляет собой металлический сосуд, наполненный взвешенным количеством воды и снабженный для защиты от потери тепла лучеиспусканием водяной рубашкой и крышкой. Равномерное распределение температуры воды, наполняющей калориметр, обеспечивается мешалкой; эта температура отсчитывается по термометру с делениями в 0,01 или 0,02°. После того как бомба помещена в калориметр, выжидают пока температура всей системы не выравняется. Затем в течение нескольких минут наблюдают небольшие изменения, которые, вследствие излучения и испарения воды, происходят сами по себе, производя отсчеты по термометру через каждую минуту. Эти отсчеты продолжаются после зажигания до тех пор, пока температура не перестанет повышаться и затем еще несколько минут после. Зная вес угля $G$, повышение температуры $\Delta t$, водяной эквивалент системы и теплоемкость воды $W$, можно определить теплотворную способность (и часто почти точно высшую теплотворную способность $Q_0$) на основании того, что выделившееся количество тепла выражается, с одной стороны, произведением $GQ_0$, а с другой $W \cdot \Delta t$; таким образом получается

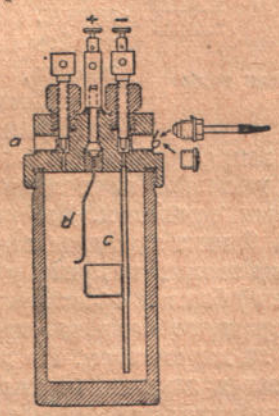



Рис. 382. Калориметрическая бомба.

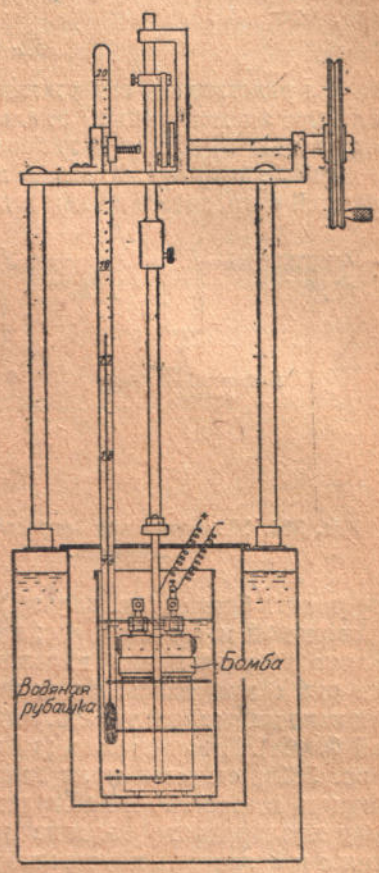



Рис. 383. Калориметр с бомбой.

$$Q_0 = \frac{W \cdot \Delta t}{G}. \qquad (1)$$

Для измерения образовавшейся воды привинчивают у $b$ короткую трубочку и присоединяют при помощи резиновой трубки взвешенную хлоркальциевую трубку (рис. 384). Затем осторожно открывают вентиль, сжатые газы удаляются через хлоркальциевую трубку, а влага поглощается. Затем при помощи аспиратора, каучукового баллона или водоструйного насоса просасывают через бомбу и хлоркальциевую трубку наружный воздух, одновременно подогревая некоторое время бомбу в масляной бане несколько выше 100°. Другая хлоркальциевая трубка (перед бомбой) пропускает в бомбу только сухой воздух. Остатки

воды в бомбе удаляются и поглощаются хлористым кальцием. Затем взвешиванием определяется приращение веса хлоркальциевой трубки [1].

Если $w_1$, будет вес воды, полученной от 1 *кг* угля, то низшая теплотворная способность будет

$$Q_u = Q_0 - 585\ w_1.$$

Здесь $w$ включает как уже имевшуюся в горючем гигроскопическую воду, так и воду, образовавшуюся при сгорании. В правилах Din DVM 3716 (Л.) указано, что

$$Q_u = Q_0 - 0{,}09 \cdot 585 \cdot h, \qquad (2a)$$

где $h$ представляет содержание водорода в горючем в весовых процентах, определенное элементарным анализом; таким образом $h$ охватывает также и водород, заключающийся в гигроскопической воде.

Вышеупомянутый *аспиратор* можно легко устроить из двух стеклянных бутылей с просверленными в двух местах пробками (лучше всего каучуковыми) и стеклянных трубок. Обе длинные трубки соединяются каучуковой трубкой, которая наполняется водой и действует как сифон. Когда бутыль *B* наполнится, то быстро меняют бутыли. Для закрывания резиновых трубок служат, в случае надобности, зажимы. При надевании каучуковых трубок на стеклянные их надо смачивать.

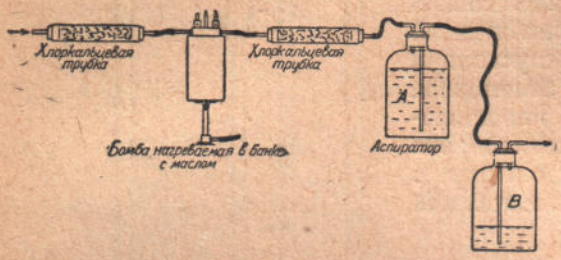



Рис. 384. Установка при определении воды сгорания.

Обращение с бомбой можно сжато изложить следующим образом: изготовить брикет (см. дальше) с запрессованной в него железной зажигательной проволокой и взвесить его; вес железной проволоки определяется предварительно из веса пучка нарезанных проволок. Вынуть бомбу из эксикатора, где она сохранялась, привязать брикет зажигательной проволокой и подвести под него маленький тигель, плотно завинтить крышку (ключ прилагается к каждой бомбе). Присоединить (точка *a*) баллон с кислородом, открыть оба вентиля (рис. 382), открыть кран кислородного баллона, продуть бомбу кислородом, закрыть вентиль *b* и наблюдать за манометром. По достижении 20 *ат* закрыть кран кислородного баллона и затем закрыть вентиль *a*. Убрать бомбу, отверстия *a* и *b* закрыть винтовыми пробками; присоединить электрическую проводку и опустить бомбу в калориметр, в который отвешивают столько воды, чтобы бомба была покрыта; пузырьки не должны подыматься; если есть пузырьки, то это означает что бомба неплотно завинчена. Пустить в ход мешалку от механического привода. Через каждую минуту (в течение 8—10 *мин*) производить отсчеты по термометру, затем зажечь проволоку; продолжать отсчеты дальше, пока не будет достигнут максимум температуры, и затем еще в течение 7 или 10 минут. Вынуть бомбу из калориметра и поместить ее в масляную баню, привинтить трубку у *a* и *b*, присоединить к ним с обеих сторон хлоркальциевые трубки, трубку, присоединенную к *a*, предварительно взвесить. Осторожно спустить давление в бомбе через вентиль *a* и опять закрыть бомбу. Присоединить со стороны *a* аспиратор и открыть сперва вентиль *a* и затем *b*; необходимо соблюдать порядок открытия. Аспиратор медленно сосет около получаса и в последние минуты масляная баня доводится до 105—110°. В заключение взвешивается хлоркальциевая трубка при *a*. При очень влажных углях (бурые угли), приходится последовательно включать несколько хлоркальциевых трубок, чтобы уловить всю воду; последняя трубка не должна показывать никакого приращения в весе.

[1] Согласно Лангбейну, («Журнал прикладной химии». 1900 г. стр. 1227) это определение воды сгорания путем возгонки является ненадежным; мне однако не приходилось сталкиваться с грубыми неточностями при его применении. Впрочем указанная статья предлагается лишь для сведения, так как здесь не затронуты погрешности от образования серной и азотной кислот.

Что касается *расчета* теплотворной способности, то надо заметить следующее. Возникающая при сгорании теплота сообщается не только воде калориметра, но частично также и металлу бомбы и калориметра; эти части нагреваются вместе с водой. Если для нагревания металлических частей на 1° требуется количество тепла, равное 0,35 *ккал*, то *водяной эквивалент* калориметра равен 0,35 *кг*: он с бомбой поглощает столько же тепла, как и 0,35 *кг* воды. Водяной эквивалент определяется опытным путем — сжиганием в бомбе вещества, теплотворная способность которого известна. Такое основное определение, служащее основанием для всех последующих, нужно производить особенно тщательно и для контроля несколько раз. Как пробное вещество служит чистая бензойная кислота $C_7H_6O_2$, с 6323 *ккал/кг* высшей теплотворной способности. Часто определяют водяной эквивалент бомбы электрическим путем.

Употребляемая для зажигания железная проволочка сама также развивает тепло. Чтобы найтп, сколько сожжено угля, нужно вычесть из веса готового угольного брикета вес железной проволочки; затем надо вычесть теплоту, развиваемую при сгорании проволочки из общего количества тепла, чтобы получить тепло, полученное при сгорании собственно угля; 1 *г* железа при полном сгорании развивает 1,6 *ккал*.

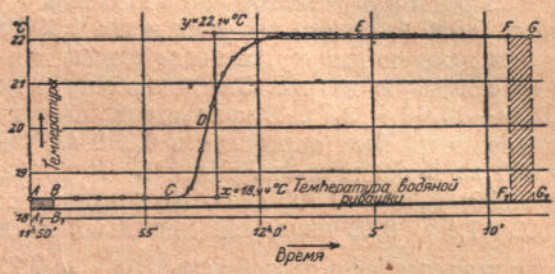



Рис. 385. Диаграмма для определения действительного повышения температуры.

Незначительная погрешность получается, если употребляемый для сжигания кислород будет немного влажным: эта влага затем измеряется, как будто происходящая из угля.

Более значительной бывает *поправка на лучеиспускание*. Разница температур $t_2 - t_1$ не может быть наблюдаема непосредственно. Вследствие теплообмена между собственно калориметром и водяной рубашкой (излучение или поглощение) температура калориметра меняется до и после сгорания; также происходит излучение и в течение собственно повышения температуры калориметра, которое длится 8÷10 *мин*; это излучение принимается в расчет внесением в отсчитанное повышение температуры поправки на излучение. Для расчета поправки на излучение, большей частью, принимают закон излучения Ньютона, согласно которому количество излученной энергии при небольших разностях температур пропорционально разнице температур между калориметром и окружающей средой и кроме того, естественно, пропорционально времени. Так как здесь дело идет о неизменяющейся массе содержимого калориметра, удельная теплоемкость которого также принимается постоянной, то тепловая потеря или выигрыш калориметра вследствие излучения будут пропорциональны этим обеим величинам.

Если на рис. 385 кривая *ABCDEFG* изображает наблюденное изменение температуры калориметра, а $A_1G_1$ такое же изменение температуры водяной рубашки, в зависимости от времени, то расстояние между обеими кривыми представляет разницу температур, а площадка, ограниченная ими и двумя ординатами времени, например $AA_1$ и $BB_1$, дает количество тепла, перешедшее в соответствующее время, от 11 *час* 50 *мин* до 11 *час* 51 *мин* с калориметра на водяную рубашку или температурную потерю калориметра; при *FG* эти потери больше, пропорционально величине заштрихованной площади. Кривые *AC* и *EG* оказываются логарифмическими кривыми, если температура водяной рубашки изменяется прямолинейно.

При кривых повышения температуры различного очертания, излучение будет одинаковым, поскольку площадь, ограниченная кривой, будет одна и та же. На этом основании можно построить диаграмму идеального процесса сгорания с мгновенным переходом тепла и эквивалентными условиями излучения. Для этого продолжаем обе кривые *AC* и *EG* к средине и проводим вертикальную прямую *yx* так, чтобы оба образовавшиеся (под температурной

и над температурной кривой) треугольных клина были равновелики по площади. Выделенный на этой вертикали отрезок изображает исправленное повышение температуры, так как такое моментальное повышение температуры не оставляет времени для проявления влияния излучения. Эту вертикальную линию с вполне достаточной точностью можно провести на глаз. Для диаграммы пользуются миллиметровой бумагой и соответственно выбирают масштаб, например, горизонтально 1 *мин* = 1 *см*, вертикально 1° С = 2 *см*. Если производить отсчет температур при *x* и *y* до одной пятой миллиметра, что легко исполнимо, то разница определяется с точностью до сотых долей градуса, следовательно при 3° повышения температуры неточность не превышает 0,3%. При более малом повышении температуры, масштаб температур следует выбирать соответственно крупнее. При таком способе вычисления наблюдения температуры окружающей среды становятся излишними. Тем не менее температура водяной рубашки оказывается учтенной в окончательном результате.

Пример. Вес брикета каменного угля 1,228 *г*, зажигательной проволоки 0,030 *г*; отсюда вес угля нетто 1,198 *г*. Отсчеты температуры производятся через каждую минуту, а после зажигания — через каждые полминуты, что дает изображенную на рис. 385 диаграмму и исправленное повышение температуры 22,14—18,44 = 3,7°. В калориметр было налито 2 *кг* воды, водяной эквивалент калориметра был определен в 0,350 *кг*; следовательно подверглось нагреванию 2,350 *кг* в водяном эквиваленте. Развитое количество тепла исчисляется в в 2,350 · 3,70 = 8,700 *ккал*. Количество тепла от сгорания железной проволоки 0,03 · 1,6 = 0,05 *ккал*, следовательно, на долю угля остается 8,650 *ккал*. Высшая теплотворная способность $\frac{8,650}{1,198}$ = 7,220 *ккал/г* = 7220 *ккал/кг*.

Низшая теплотворная способность определяется так: хлоркальциевая трубка весила после испытания 61,886 *г*, перед испытанием 61,254 *г*, привес 0,632 *г* воды. Следовательно, при горении развивается 0,632/1,198 = 0,528 *г* воды/*г* угля = = 0,528 *кг* воды/*кг* угля. В единицах тепла это соответствует 0,528 · 585 = = 309 *ккал* на 1 *кг* угля; низшая теплотворная способность 7220—309 = = 6910 *ккал/кг*.

*Отбор и обработка пробы* представляют самый важный момент исследования. Отобранная проба должна представлять среднее исследуемой партии угля. Проба после отбора не должна претерпевать никаких изменений, в особенности она не должна терять воду; если потери воды неизбежны, то они должны быть учтены.

При длительных испытаниях, от каждой привозимой тачки отбирают по одной лопате угля; согласно правил Din DVM 3711 (Л.) к концу испытания должно быть отобрано от 0,025 до 0,5% израсходованного количества в зависимости от его однородности. Это количество грубо измельчается, хорошо перемешивается, затем разравнивается и разделяется проведенной крест на крест чертой приблизительно на четыре равные части. Более крупные куски угля предварительно настолько измельчаются, чтобы можно было рассчитывать на приблизительно равномерное их распределение между четырьмя частями. Затем отбираются две лежащие по диагонали части, в общем, половина, однако так, чтобы не оставалась принадлежащая этой половине мелочь. Лучше всего это достигается тем, что измельчение производится на четырех прямоугольных соответственно уложенных листах железа; остальная половина отбрасывается. Оставшаяся половина опять размельчается, смешивается, разравнивается и делится на четыре части и так далее, пока не останется 2 или 3 *кг*, которые отсылаются в лабораторию. Говорят, что первоначальная проба *сгущена* до 2—3 *кг*.

Из лежащей кучи, из полной баржи, т. е. из неподвижной массы угля, почти невозможно отобрать хорошую пробу (Л.).

Теплотворная способность топлива меняется под влиянием атмосферных условий. Каменный уголь не менее чувствителен. Во всяком случае, отобранные из отдельных тачек количества угля до смешения следует сохранять в закрытом ящике, а окончательно приготовленную для отсылки или сохранения пробу надо запаивать в жестянку или закупоривать в стеклянную посуду. Весьма чувствительными к влиянию атмосферы являются бурые угли, торф,

дрова, содержащие много воды. Следует испытать на личном опыте возможность взвешивания на воздухе многих последовательных проб бурого угля, так как они, теряя воду, становятся легче. Иногда приходится отказываться от смешивания и размельчения и довольствоваться исследованием кускового материала, который нужно сохранять герметически закупоренным.

Так как иногда такие влажные *угли* совсем или очень плохо горят в бомбе, то их предварительно сушат на воздухе, определяя, однако, процентную убыль веса при сушке. Вода, которую уголь теряет этим способом, принимается во внимание при расчете низшей теплотворной способности точно также, как и получающаяся позже из бомбы. Такая поправка производится следующим образом: 13,52 *кг* бурого угля были высушены на воздухе в течение 2—3 дней до веса 8,91 *кг*; потеря веса 4,61 *кг* = 51,7% *оставшегося* угля. Из оставшегося сухого угля сожжено 1,021 *г*, причем получено 0,670 *г* воды и найдена высшая теплотворная способность 3041 *ккал/кг*. Если бы уголь не был высушен, то такое же количество угля было бы на 51, 7% тяжелее, следовательно весило бы на 0,528 *г* больше, но дало бы также на 0,528 *г* больше воды. Высшая теплотворная способность первоначального угля была, следовательно, $3041 \cdot \frac{100}{151,7} = 2005$ *ккал/кг*. Один грамм угля дал бы $\frac{0,670 + 0,528}{1,021 + 0,528} = 0,774$ *г* воды; ее скрытая теплота парообразования 464 *кал*, и низшая теплотворная способность первоначального угля равна 2005—464 = 1541 *ккал/кг*.

Для введения в бомбу бурый уголь обвивается железной проволокой, которую и укрепляют к полюсам. Каменный уголь толчется совершенно мелко и спрессовуется в прилагаемом к бомбе прессе в брикет. В брикет одновременно запрессовуется и зажигательная проволока. Кокс и антрацит, которые не образуют прочного королька, лучше всего сжигать в форме зерен от 1 до 2 *мм* в диаметре, в платиновом тигельке, или же брикет изготовляется с добавкой сиропа или смолы. Весьма бедные шлаки, которые сами по себе не загораются, приходится смешивать с более горючими веществами. В обоих случаях, естественно, приходится принимать в соображение выделение тепла примесями. Для этого надо знать теплотворную способность примесей и количественное содержание их в смеси.

При помощи бомбы достигаются удовлетворительные результаты только при тщательном производстве наблюдений и соблюдении всех мер предосторожности. Работа с бомбой требует навыка. Поэтому очень часто пробы угля посылаются в одно место, специально оборудованное для определения теплотворной способности, например, в химико-технические институты при высших школах или в специальные научно-исследовательские институты.

Кроме того, теплотворная способность часто может быть найдена достаточно точно для практической эксплоатации путем *анализа*, причем отдельным горючим составным частям приписывается определенная, остающаяся постоянной, теплотворная способность. Затем, определяя негорючие составные части, $H_2O$ и золу, можно найти теплотворную способность топлива путем расчета.

Принимать теплотворные способности горючих составных частей за неизменные можно тогда, когда производство почти регулярно снабжается углем одинакового происхождения, ибо отдельные поставки бурого угля в особенности в различной степени загрязнены камнями или песком или, в зависимости от погоды, обладают различным содержанием влаги.

Если, например, 1 *кг* топлива состоит из $b$ *кг* горючего вещества теплотворной способности $Q_b$, а также из $w$ *кг* воды и $a$ *кг* золы, то результирующая теплотворная способность данного угля

$$Q_u = Q_e \cdot b - 585\ w, \tag{3}$$

где $b$ получается как

$$b = 1 - a - w. \tag{4}$$

Определение $a$ и $w$ будет описано в следующих параграфах.

Этот способ определения теплотворной способности является, конечно, только приближенным способом. Однако, при приемке поставляемого угля, основные ошибки происходят при отборе пробы и обработке ее. По сравнению с ошибками, которые возникают, когда из вагона или даже из целой баржи отбирают несколько лопат из произвольно выбранных мест и наскоро производят смешение угля при недостаточных вспомогательных средствах, собственно колебания в определении теплотворной способности отдельных проб топлива не играют роли.

Вместо того, чтобы производить сжигание угля в бомбе со сжатым кислородом, пробовали *производить сжигание в токе кислорода при атмосферном давлении*. Имеются многочисленные приборы, приспособленные для такого рода работ и могущие служить для испытания легко сгорающих материалов. Для углей, содержащих тяжелые углеводороды они, кажется, неприменимы, так как образуется копоть и тогда теплотворная способность определяется не полностью. Другим прибором, позволяющим избегнуть применение неудобной бомбы, является калориметр Парра; в сосуд, имеющий форму бомбы, вводится уголь в смеси с богатым кислородом соединением, большей частью с перекисью натрия. Сгорание происходит при отдаче такою солью своего кислорода, при атмосферном давлении, зажигание производится вбрасыванием раскаленной медной стружки через обратный клапан; освобождающаяся теплота измеряется, как и при бомбе, в калориметре. Однако, освобождающееся количество теплоты не является теплотворной способностью топлива, так как $CO_2$ и $H_2O$ не остаются свободными, но образуются соединения, теплоту образования которых мы и измеряем. Это можно принять во внимание путем введения поправочного коэфициента, что является паллиативом.

**§ 141. Состав угля.** В дополнение к определению теплотворной способности часто приходится производить определение главных составных частей угля.

Определять содержание воды можно постепенно, оставляя сначала уголь лежать около 14 дней непокрытым и рассыпанным тонким слоем в теплой комнате и определяя затем получившуюся потерю в весе. После этого уголь можно рассматривать как воздушно-сухой. Потеря в весе обозначается как явная или капиллярная влажность угля.

Уголь подвергшийся такой обработке, тем не менее еще содержит воду, даже помимо того, что в его твердых составных частях содержится и водород, и кислород, которые можно представлять себе также соединившимися в воду. Именно, если небольшое количество воздушно-сухого угля в фарфоровом тигле осторожно нагревать в вакууме, то еще оставшаяся вода улетучивается. Остаток называется *сухим* веществом. Под наименованием *гигроскопической воды* понимается общая, до сих пор полученная потеря веса, следовательно, включая уже определенную раньше капиллярную влагу. Если нагревать без применения вакуума, то по запаху легко определить, что в этом случае улетучивается не только вода, но и другие вещества, даже при осторожном нагревании только до 110° (Л.).

Летучие вещества улетучиваются при нагревании плотно закрытого тигля в течение нескольких минут над бунзеновской горелкой до красного каления и немедленно затем до белого перед паяльной трубкой. В тигле остается королек *кокса* различного вида, в зависимости от сорта угля. Однако, остаток не содержит всего углерода угля, так как выделившиеся газы состоят большей частью из углеводородов. Это определение количества кокса имеет мало значения, так как, в случае надобности, его можно опустить и прямо перейти к определению содержания золы.

Для определения *содержания* золы остаток, представляющий или сухое вещество или кокс, сильно прокаливается в открытом, косо поставленном тигле, при помешивании до тех пор, пока больше не будет замечено никакой убыли в весе; остаток является золой или негорючей частью.

При такой последовательности испытаний мы не получаем общего *содержания углерода* в угле. Это содержание желательно знать, если с его помощью нужно определить количество дымовых газов и таким образом найти потери

с отходящими газами (§ 150). Общее содержание углерода определяется, проще всего, вместе с низшей теплотворной способностью. Продукты сгорания из бомбы должны пройти через хлоркальциевую трубку для определения воды сгорания (рис. 384). Осушенный таким путем газ пропускается еще через калиаппарат и затем еще раз через хлоркальциевую трубку и только после этого попадает во всасывающий аспиратор. Калиаппарат содержит раствор едкого кали, через который и проходят поступающие из бомбы продукты сгорания. В калиаппарате поглощается вся образовавшаяся в бомбе углекислота, поэтому вес его увеличивается. Однако, одновременно проходящий газ увлекает из калиаппарата влагу; чтобы удержать последнюю нужна вторая хлоркальциевая трубка. Приращение в весе предварительно взвешенного комплекта из калиаппарата и второй хлоркальциевой трубки составляет таким образом количество образовавшейся из угольного брикета $CO_2$. Согласно молекулярным весам, из 12 частей С образуется 44 части $CO_2$; отсюда можно вычислить, сколько углерода содержалось в угольном брикете. При определении теплотворной способности, результаты которого уже были приведены, было также определено содержание углерода. Калиаппарат после пропускания газов весил 81,83 *г*, до этого он весил 78,62 *г*. Разница в 3,21 *г* соответствует $3{,}21 \cdot \frac{12}{14} = 0{,}876$ *г* С, которые содержались в 1,198 *г* угля; следовательно, уголь содержал $\frac{0{,}876}{1{,}198} \cdot 100 = 73{,}1\%$ углерода.

Содержание в топливе *водорода* вычисляется также сравнительно просто Вода, которая была отогнана из бомбы при определении низшей теплотворной способности, частью уже находилась в виде гигроскопической воды в топливе (ее процентное содержание определяется как указано выше), частью она образовалась при сгорании из водорода. Эта последняя представляет разность между общим количеством воды сгорания и гигроскопической водой топлива. Отсюда получается и содержание водорода в угле; оно составляет девятую часть этой разности.

Остается заметить, что при подобных исследованиях техник вторгается уже в область химии, которую ему предварительно приходится изучать. Поэтому часто предпочитают предоставлять исследование углей химическим институтам, которые располагают для этого не только бомбой, но и общими методами элементарного анализа.

Состав топлива выражается в процентах или первоначального веса или веса воздушно-сухого угля.

**§ 142. Газообразное топливо.** В калориметре Юнкерса для газообразного горючего (рис. 386) исследуемый газ сжигается внутри калориметра; его количество $G$ измеряется посредством газовых часов. Сгоревшие газы идут вверх, затем сквозь пучок трубок опять вниз и удаляются через $A$, где измеряется их температура $t_r$. При этом, они отдают образовавшееся тепло воде, которая омывает упомянутый пучок труб равномерным, протекающим под определенным напором, потоком; термометры $t_e$ и $t_a$ дают температуру как поступающей, так и уходящей воды. При помощи весов или мензурки (рис. 389) наблюдается количество воды $W$, протекающее через калориметр за то время, когда будет сожжено определенное количество газа, большей частью 3 *л* или 30 *л*. Если $G_0$ будет исчисленный из $G$ приведенный объем газа, то высшая теплотворная способность будет

$$Q_0 = \frac{W \cdot (t_a - t_e)}{G_0}. \qquad (5)$$

Сгоревшие газы должны отходить через $A$ при комнатной температуре.

При $y$ уходящая вода стоит у края воронки; при $x$ поступающая вода подымается в уровень с краем $s$ внутреннего кольца; когда поступающую воду пускают с некоторым избытком, этот избыток переливается через край $s$ наружу. Поэтому вода течет под постоянным напором $h$, и посредством вентиля можно регулировать поступающее количество независимо от колебаний давления в водопроводе. Для этого нужно только, чтобы через перелив (рис. 386, добавочная

фигура вверху, налево) всегда стекало немного воды. Перед тем, как вода дойдет до термометра $t_a$, она основательно перемешивается рядом плоских колпачков, снабженных крестообразно расположенными прорезами.

Горелка представляет собою бунзеновскую горелку, подачу воздуха в которую можно изменять поворотным кольцом. Само по себе тепло может выделяться и при сжигании светящимся пламенем. Однако, образования на холодных поверхностях калориметра копоти можно избежать лишь при голубом пламени. Наблюдение за пламенем производится снизу посредством зеркала (рис. 389).

Можно рекомендовать применение *искусственного приема Румфорда*, согласно которому температура помещения должна лежать посередине между температурами поступающей и уходящей охлаждающей воды, чтобы ограничить и скомпенсировать потери на излучение. Для калориметра с бомбой и во многих других случаях это правило подходит; в калориметре же Юнкерса газы уходят слишком холодными, а именно при температуре притекающей охлаждающей воды. Лучше заставлять охлаждающую воду притекать при комнатной температуре. Для предотвращения излучения калориметр по возможности защищается кожухом с неподвижным воздухом. Никелировка кожуха также служит для уменьшения излучения, и должна быть возможно чистой. Никелированная поверхность чистится стеариновым маслом. Для уменьшения излучения тепла лучше работать с большими количествами воды при малых приростах температур.

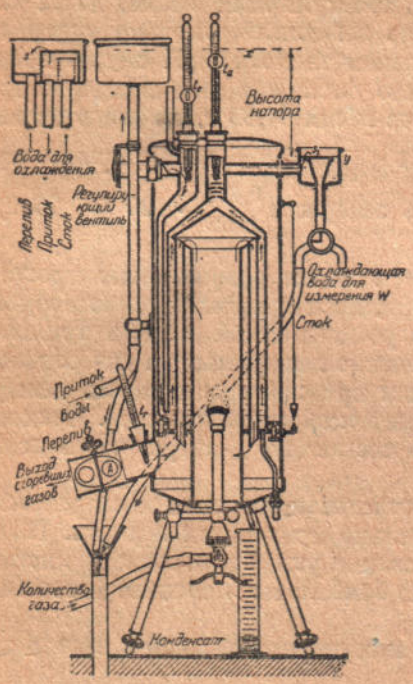



Рис. 386. Калориметр Юнкерса.

Описанное измерение дает высшую теплотворную способность. Для определения низшей — внизу кожуха устроен штуцер, из которого стекает конденсат, охлаждающийся в пучке трубок из охлажденных газов. Его измеряют и затем вычисляют количество конденсата $w_1$, которое получилось бы из 1 $м^3$ $\left(\frac{0}{760}\right)$ газа. Произведение $585 \cdot w_1$ представляет освобождающееся при конденсации тепло, которое следует вычесть. Низшая теплотворная способность таким образом будет $Q_u = Q_0 - 585 w_1$.

Так как получающееся из 3 *л* газа количество конденсационной воды составляет только несколько граммов, из которых некоторые капли остаются к тому же в калориметре, то измерение такого количества конденсата не будет надежным. Измерение конденсационной воды нужно производить с большими количествами газа, примерно с 15 *л*, и в том случае, если для самого калориметрирования можно удовольствоваться 3 *л*.

Пример. В то время, как через газовые часы прошло 10 *л* газа, было учтено (взвешено) 4,96 *кг* воды. Как среднее из всех отсчетов, которые всегда производились при проходе через часы одного литра газа, температура поступающей воды получается 15,17°, а отходящей 25,33°. Таким образом $4{,}96 \cdot 10{,}16 = 50{,}4$ *ккал* есть тепло, развитое 10 *л* газа, который, однако, имел температуру 17,5° и находился под избыточным давлением в 14 *мм* $H_2O$; показание барометра 741 *мм* Hg. Газ имел, следовательно, абсолютное давление 742 *мм* Hg. Его приведенный объем был $10 \cdot \frac{273}{273 + 17{,}5} \cdot \frac{742}{760} = 9{,}18$ *л* $\left(\frac{0}{760}\right)$. Следовательно, газ имел высшую теплотворную способность $50{,}4/9{,}18 = 5{,}49$ *ккал/л* $= 5490$ *ккал* $/м^3 \left(\frac{0}{760}\right)$. Затем, когда через газовые часы прошло 30 *л*, была собрана конденсационная вода, которой оказалось 29,5 *г*. (Мензурка *W*, на рис. 389

измеряет менее точно). 30 *л* газа составляют $3 \cdot 9{,}18 = 27{,}54$ *л* в приведенном состоянии, таким образом из приведенного кубического метра газа получилось $\frac{29{,}5 \cdot 1000}{27{,}45} = 1075$ *г* $= 1{,}075$ *кг* воды, которые при своей конденсации выделили $1{,}075 \cdot 585 = 630$ *ккал*. Низшая теплотворная способность, следовательно, $5490 - 630 = 4860$ *ккал/м*$^3$ $\left(\frac{0}{760}\right)$.

*Точность калориметра Юнкерса* для технических целей, при внимательном обращении с ним, достаточна. Внимание должно быть направлено, главным образом, на правильность показаний газовых часов.

Приходится слышать доводы, что *источник погрешностей* лежит в том, что отходящие газы покидают калориметр насыщенными влагой, в то время как подводимый для сгорания воздух ею не насыщен. Поэтому измеренное количество воды сгорания слишком мало. Последнее верно, если газы отходят при температуре помещения, однако погрешности при определении низшей

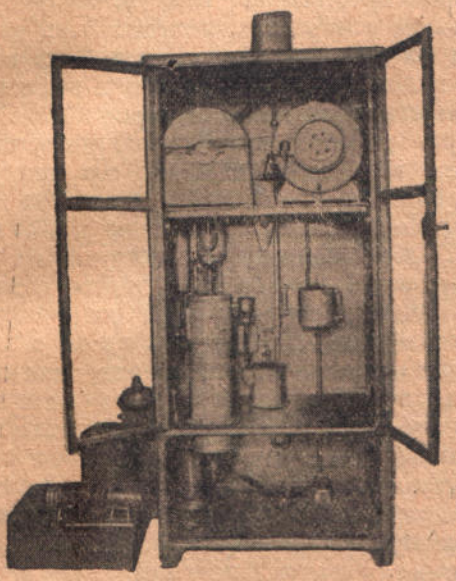


Рис. 387. Автоматический калориметр Юнкерса Ленинградского завода «Теплоприбор».

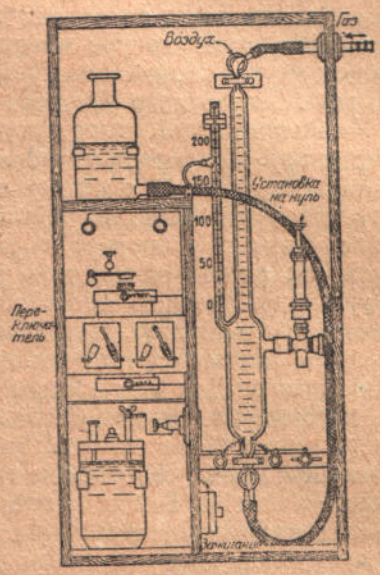



Рис. 388. Газовый калориметр «Унион».

теплотворной способности от этого не возникает. Высшая теплотворная способность будет (1 до 2%) меньше на величину избытка влажности. Эта погрешность в свою очередь уравновешивается тем, что измеренное количество воды сгорания несколько меньше действительного. Поэтому, если рассматривать, как решающую, низшую теплотворную способность, то не возникает никакой погрешности. Однако, к калориметру Юнкерса может быть также присоединен увлажнитель воздуха, чем устраняется и это затруднение.

Газ и при измерении и при сжигании насыщен влагой. Поэтому если по газовым часам отсчитано 3 *л*, то часть их составляет водяной пар и остальная часть—светильный газ. При 20° водяной пар имеет давление 17 *мм* Hg. При 760° общего давления влажный газ, следовательно, состоит на 2,2% своего объема из воды, 97,8% представляет газ. Таким образом, теплотворная способность собственно газа выше, чем определяется. Приводя путем перерасчета теплотворную способность к сухому газу, мы приходим к конечной цели исследования; на производстве же газ также проходит через газовые часы и содержит влагу; иногда может оказаться желательным сохранить эти условия при калориметрировании. Нужно только заботиться о том, чтобы газ в обоих случаях имел одинаковую влажность, а, следовательно, в обоих случаях и одинаковую температуру, когда он проходит газовые часы. Калориметрирование дает, следовательно, различные результаты, в зависимости от температуры газа в газовых часах.

Простое приведение объема газа к 0° и 760 *мм* не устраняет этой разницы. Для этого необходимо приводить к *сухому* газу при 0° и 760 *мм*, что является научно правильным.

Там, где давление испытуемого газа колеблется, как при газогенераторных установках или при колошниковых газах, там для калориметрирования, а также для измерения нужно поддерживать давление сжигаемого газа постоянным. Для этой цели служит *регулятор давления*, в котором дроссельный вентиль под влиянием поплавка дросселирует ток газа за регулятором до постоянного давления, высоту этого давления можно изменять, меняя нагрузку поплавкового колокола.

Находящийся под вакуумом генераторный газ можно засасывать в одну из двух составляющих аспиратор больших бутылей (баллоны из-под кислоты), и затем, переставляя бутыли, получать необходимое давление. Этот способ имеет еще то преимущество, что при медленном и продолжительном засасывании получается смесь газа в различные промежутки времени, а поэтому со *средней* теплотворной способностью. Изменения, которые претерпевает газ, вследствие поглощения отдельных составных частей водою аспиратора, должны быть незначительными, особенно при многократном использовании одной и той же воды. Имеются также специальные устройства и для непрерывной подачи засасываемого газа. Калориметр Юнкерса изготовляется также переносным.

*Автоматический калориметр Юнкерса* работает подобно обыкновенному калориметру. Газ проходит через газомер, вода через водомер; оба принудительно связаны шарнирной цепью таким образом, что подача воды и газа друг другу пропорциональны, поэтому повышение температуры воды прямо пропорционально теплотворной способности. Обе температуры действуют на термобатарею; указывающий или регистрирующий прибор дает таким образом высшую теплотворную способность. В качестве охлаждающей воды служит дестиллированная вода, циркуляция которой поддерживается насосом с электрическим приводом и которая охлаждается в холодильнике, наполненном кольцами Рашига. Для охлаждения прибора служит идущий для сжигания воздух, который на кольцах Рашига насыщается влагой. Охлаждающая вода протекает также и через газомер. Таким образом, газ, воздух для сгорания и отходящие газы имеют одинаковую температуру и при этой температуре они также насыщены влагой. Благодаря таким мероприятиям, которые могут быть перенесены и на обыкновенный ручной калориметр, показания теплотворной способности сделаны насколько возможно точными. Электрические показания можно отнести к приведенным объемам. Низшая теплотворная способность может быть вычислена по собираемому конденсату. Предохранитель в случае недостачи воды закрывает (так же как в ванных печах) приток газа.

Удовлетворительным для большинства целей и весьма удобным является изображенный на рис. 388 *газовый калориметр «Унион»*. В нем теплота, развиваемая при сгорании определенного количества испытуемого газа, сравнивается с теплотой, развиваемой при сгорании такого же объема гремучего газа. Стеклянный сосуд, окруженный наполненной керосином рубашкой, сам наполняется водой, которая, посредством резинового рукава, находится в сообщении с водой, наполняющей сифонную склянку. Аккумулятор подает ток к двум впаянным внизу стеклянного сосуда электродам, ток разлагает воду так, что калориметрический сосуд наполняется гремучим газом; если нажимом на кнопку привести в ход индуктор, то поток искр между электродами вызывает опять сгорание гремучего газа. Выделяющееся количество тепла переходит в наполняющий рубашку керосин, расширение которого служит мерою количества тепла. При помощи устройства для установки на нуль, калориметрическая жидкость в соединенном с рубашкой вертикальном и открытом сверху капилляре приводится перед вспышкой к нулю; после вспышки жидкость поднимается на некоторое число делений, которое и отсчитывается.

Калориметрический сосуд затем снова наполняется водой и, при помощи верхнего трехходового крана, в него засасывается отмеренная проба исследуемого газа, а затем достаточное для сжигания количество воздуха, так что электроды опять освобождаются от воды и снова могут служить для зажигания. Ка-

лориметрическая жидкость, которая перед этим опять была установлена на нуль, снова поднимается в капилляре на некоторое число делений. Оба отсчета дают отношение образовавшихся количеств тепла, а с учетом употребленных объемов — отношение высших теплотворных способностей. Высшая теплотворная способность 1 $м^3$ $\left(\frac{0}{760}\right)$ гремучего газа равна $^2/_3$ от 3060 = 2040 *ккал*.

Этот метод, как сравнительный, не требует никакого приведения к нормальному состоянию. При помощи калориметра «Унион» можно калориметрировать не горящие газы, например, продукты неполно проведенного сжигания путем предварительного смешения их в подходящей пропорции с гремучим газом. Для этого требуются лишь маленькие пробы. В этом значительные преимущества калориметра «Унион» перед калориметром Юнкерса; для многих целей он может заменить последний.

**§ 143. Жидкое топливо. Союзная формула.** Для исследования жидких горючих в калориметр Юнкерса вводится газообразующая горелка (типа примусной горелки), в которую горючее подается давлением воздуха; она подвешена на одной стороне весов (рис. 389). Сторона весов с горелкой будет по мере сгорания становиться все легче; если наполненную горелку не вполне уравновесить, то в некоторый момент весы пройдут через положение равновесия. Когда при этом стрелка весов проходит через нуль, начинают замер воды так же, как и отсчет температур. Затем снимают с чашки весов определенный груз; весы опять должны будут пройти нулевую точку, как скоро со стороны горелки сгорит такой же вес; в этот момент заканчивают замер воды. Расчет теплотворной способности такой же, как и при газе. Точно так же измеряется и конденсат. Однако, работа с упомянутой горелкой не так проста, по крайней мере, с горючими, с трудом превращающимися в газ.

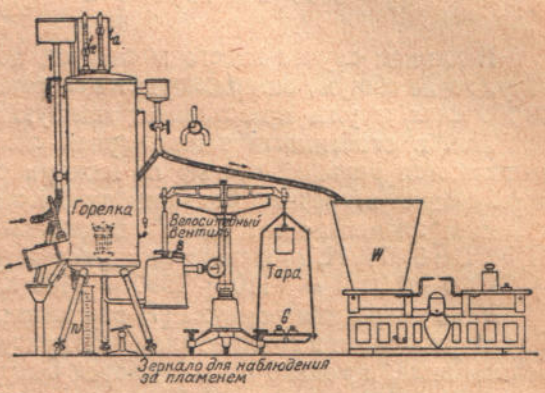


Рис. 389. Приспособление калориметра Юнкерса для жидких горючих материалов.

Жидкое горючее можно также калориметрировать в бомбе, пропитывая им вату и погружая зажигательную проволоку в вату. Чтобы достигнуть полного, свободного от копоти сгорания, необходимо сначала путем опыта установить правильные, в зависимости от рода горючего, соотношения. Конечно, необходимо принимать в расчет теплотворную способность ваты (целлюлоза 4210 *ккал/кг*).

Калориметрирование некоторых жидких горючих представляет большие трудности, поэтому при них, скорее чем при твердых и газообразных, предпочитают при случае лучше определять теплотворную способность расчетным путем, по их химическому составу.

Для химически определенных горючих веществ, как спирт или бензол, теплотворные способности можно брать из таблиц, после того как содержание воды (для спирта) определено путем измерения удельного веса, по таблицам. Проведение законченного расчета не всегда бывает вполне простым; во многих случаях числовые материалы имеются в неполном виде. Так, при спирте тепло развивает только содержащийся в нем алкоголь. Содержащаяся в нем вода не только не принимает никакого участия в развитии тепла, но даже — при расчете низшей теплотворной способности — переводит тепло в скрытое состояние. Точно так же при разведении абсолютного алкоголя водой освобождается теплота растворения, которая при сгорании снова уже не проявляется.

При химически неопределенных веществах, как бензин или керосин, приходится обращаться к *международной формуле* (установленной Международным Союзом Обществ надзора за паровыми котлами), которой можно пользо-

ваться и для твердых видов топлива. Согласно этой формуле, теплотворная способность топлива, в котором содержание углерода, водорода, кислорода, серы и воды определено элементарным анализом и выражено числами $c$, $h$, $o$, $s$ и $w$, отнесенными к 1 *кг* топлива, вычисляется следующим образом:

$$Q_0 = 8100 \cdot c + 34\,000 \cdot \left( h - \frac{1}{8} \cdot o \right) + 2500 \cdot s \text{ ккал/кг} \qquad (6)$$

Здесь числа 8100, 34 000 и 2500 представляют теплотворные способности соответствующих элементов; $\frac{1}{8} \cdot O$ есть количество водорода, необходимое для связывания находящегося в топливе кислорода и теплота сгорания которого поэтому вторично не освобождается. Низшая теплотворная способность будет:

$$Q_u = 8100 \cdot c + 29\,000 \left( h - \frac{1}{8} \cdot o \right) + 2500 \cdot s - 585 \cdot w. \qquad (7)$$

В данном случае вместо $w$ следует подставлять только гигроскопическую воду, но не общую, содержащуюся в сгоревших газах воду $W = w + 9h$; так как 29 000 *ккал/кг* уже представляет низшую теплотворную способность водорода.

Так, в особенности теплотворная способность моторного *топлива* (нефти) вычисляется большей частью по международной формуле, так как прямое их определение встречает большие трудности. Если, например, произведенный химиком элементарный анализ показывает, что моторное топливо содержит 87,7% C и 6,87% H, то низшая теплотворная способность выразится $8100 \cdot 0{,}877 + 29\,000 \cdot 0{,}0687 = 7110 + 1990 = 9100$ *ккал/кг*.

Международная формула (7) рассматривает явление сгорания так, как будто бы содержащиеся в топливе элементы присутствовали там *как таковые* т. е. в свободном виде, и только один кислород был уже связан с водородом, Это не соответствует действительности. Элементы находятся там в форме сложных соединений, в особенности в виде разнообразнейших углеводородов, и их теплотворная способность не равна сумме теплотворных способностей элементов, но должна отличаться от нее на собственную теплоту образования. Поэтому, формула не может давать никаких вполне точных значений. Как бы то ни было, ее результаты большей частью не слишком отличаются от теплотворных способностей, определенных калориметрически; отклонение редко бывает больше чем 2—3%.

---