

ББК 349  
К 38  
УДК 531.75.08

Кивилис С. С.

К 38 Плотномеры.— М.: Энергия, 1980.— с., ил.

В пер.: 95 к.

Рассматриваются основы физических принципов измерений плотности жидкостей, газов и твердых веществ, систематизирован и обобщен обширный материал по плотномерам, разработанным в СССР и за рубежом. Описаны принципы действия, схемы и примеры конструкций плотномеров, показаны современные направления в развитии таких приборов. Приведены основные технические характеристики, дан анализ погрешностей, а также сравнительных достоинств и недостатков плотномеров разных систем.

Рассчитана на инженерно-технических и научных работников, занимающихся разработкой плотномеров и изменениями плотности веществ. Может также служить учебным пособием для студентов вузов и техникумов.

К 30306-270 185-80. 2404000000  
051(01)-80

ББК 349  
6П2.1.081

© Издательство «Энергия», 1980 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Плотность является одной из основных физических величин, характеризующих свойства веществ. Измерение плотности веществ играет существенную роль при проведении исследовательских работ в различных отраслях науки и техники, а также при осуществлении контроля за технологическими процессами и качеством продукции. Научные основы измерения плотности были заложены в трудах русских ученых Д. И. Менделеева, А. Н. Доброхотова, Н. С. Михельсона, И. К. Турубинер, М. Д. Иппиц и др.

Следует отметить большое значение приборов для автоматического измерения плотности, которые являются весьма важным элементом комплексной автоматизации производственных процессов во многих отраслях промышленности (химической, металлургической, нефтяной, пищевой и др.).

Разработке и исследованию новых принципов измерения плотности, созданию конструкций плотномеров, основанных на этих принципах, освоению и расширению промышленного производства плотномеров уделяется все большее внимание. Возрастание роли и значения измерений плотности обусловлено в значительной мере непрерывным увеличением номенклатуры технологических процессов и производств, в которых расход веществ, участвующих в осуществлении процессов, оценивается по массе, причем массовый расход определяется путем отдельных автоматических измерений объемного расхода и плотности с последующим автоматическим перемножением результатов этих измерений. Весьма велика роль измерения плотности и в организации системы количественного учета (по массе) веществ при их приеме, хранении и отпуске, когда масса вещества не может быть измерена непосредственным взвешиванием на весах и ее приходится определять по результатам измерений объема и плотности.

Вопросы точного измерения плотности имеют существенное значение при создании измерительных средств в различных отраслях приборостроения и метрологии, связанных с анализом свойств и состава веществ [18, 151]. Важное значение приобретают различные методы измерения плотности веществ в космических исследованиях [165], при решении проблемы охраны окружающей среды во всем ее многообразии, при исследовании плазмы [98], а также в других новых областях науки и техники.

В настоящей книге сделана попытка систематизировать и обобщить большой материал, накопленный в мировой практике разработки различных методов и средств измерения плотности жидких, газообразных и твердых веществ.

Книга рассчитана на инженерно-технических и научных работников, занимающихся разработкой, исследованием, производством, наладкой и эксплуатацией средств контроля технологических процессов. Она может быть использована также студентами и аспирантами соответствующих специальностей.

Автор признателен рецензенту проф. М. В. Кулакову и редактору инж. Э. К. Щепину за критические замечания и пожелания, способствовавшие улучшению рукописи книги.

Автор

## ВВЕДЕНИЕ

Различные вещества, имеющие при одинаковой температуре равные объемы, могут обладать различной массой, и наоборот, вещества с одинаковой массой могут занимать различные объемы. Отношение массы вещества к его объему является физической величиной, которая характеризует свойства данного вещества и называется *плотностью*. Таким образом,

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (\text{В-1})$$

где  $\rho$  — плотность однородного вещества или средняя плотность неоднородного вещества;  $m$  и  $V$  — соответственно масса и объем вещества.

Здесь коэффициент пропорциональности принят равным 1, что достигается соответствующим выбором единиц величин, входящих в формулу: все величины должны быть выражены в одной системе единиц.

Для неоднородного вещества плотность в точке находится как предел отношения массы к объему, когда объем стягивается к точке, в которой определяется плотность:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V},$$

где  $\Delta m$  — масса элементарного объема  $\Delta V$ .

Так как плотность вещества зависит от температуры, то при обозначении (в индексе) указывают температуру, при которой измерена плотность. Например, обозначение  $\rho_{20}$  соответствует плотности при температуре 20°C.

Из формулы (В-1) видно, что размерность плотности  $[\rho]$  можно выразить следующим образом:

$$[\rho] = ML^{-3}, \quad (\text{В-2})$$

где  $M$  — размерность массы;  $L$  — размерность длины.

За единицу плотности принимается плотность такого однородного вещества, единица объема которого содержит единицу массы.

В соответствии с ГОСТ 9867-61 «Международная система единиц» и СТ СЭВ 1052-78 «Метрология. Единицы физических величин» единицей плотности в международной системе (СИ) является килограмм на кубический метр (кг/м<sup>3</sup>).

Наряду с единицей СИ допускаются внесистемные единицы плотности: тонна на кубический метр (т/м<sup>3</sup>), килограмм на литр (кг/л).

В качестве кратных и дольных единиц плотности рекомендуются: мегаграмм на кубический метр (Мг/м<sup>3</sup>), килограмм на кубический дециметр (кг/дм<sup>3</sup>), грамм на кубический сантиметр (г/см<sup>3</sup>), грамм на кубический дециметр (г/дм<sup>3</sup>), грамм на литр (г/л) и грамм на миллилитр (г/мл).

При применении единиц плотности, являющихся производными от внесистемной единицы объема «литр», следует иметь в виду, что согласно принятому в 1964 г. решению XII Генеральной конференции по мерам и весам 1 л=1 дм<sup>3</sup>, в то время как ранее существовало соотношение 1 л=1,000028 дм<sup>3</sup> (т. е. 1 г/мл=0,999972 г/см<sup>3</sup>). Это необходимо учитывать при пользовании литературой (в особенности справочной) прежних лет издания.

Формула (В-2) позволяет установить связь между различными единицами плотности. Так как

$$1 \text{ т}=10^3 \text{ кг}=10^6 \text{ г}=1 \text{ Мг}$$

и

$$1 \text{ м}^3=10^3 \text{ дм}^3=10^3 \text{ л}=10^6 \text{ см}^3=10^6 \text{ мл},$$

то

$$1 \text{ т/м}^3=1 \text{ Мг/м}^3=1 \text{ кг/дм}^3=1 \text{ кг/л}=1 \text{ г/см}^3=$$

$$=1 \text{ г/мл}=10^3 \text{ кг/м}^3=10^3 \text{ г/дм}^3=10^3 \text{ г/л}.$$

Как известно, измерить какую-либо величину — значит определить отношение значения этой величины к ее единице. Числа, представляющие собой результат измерения данной величины в различных единицах, обратно пропорциональны этим единицам: во сколько раз одна из единиц больше другой, во столько раз числовое значение величины в первом случае меньше, чем во втором. Для того чтобы результат измерения, выполненного в одной единице, выразить в другой единице, необходимо этот результат умножить на переводной множитель, равный отношению первой единицы ко второй.

В применении к измерению плотности изложенное правило можно записать в общем виде следующим образом:

$$\rho_2 = \frac{N_1}{N_2} \rho_1, \quad (\text{В-3})$$

где  $\rho_1$  — плотность, выраженная в единице  $N_1$ ;  $\rho_2$  — плотность, выраженная в единице  $N_2$ .

Например, плотность  $\rho_1$ , измеренную в г/см<sup>3</sup> ( $N_1$ ), можно выразить в кг/м<sup>3</sup> ( $N_2$ ), учитывая, что 1 г/см<sup>3</sup>=1000 кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_2 [\text{кг/м}^3]=1000 \rho_1 [\text{г/см}^3]. \quad (\text{В-3а})$$

Диапазон значений плотности природных веществ и сред исключительно широк. Так, плотность межзвездной среды не превышает 10<sup>-21</sup> кг/м<sup>3</sup>, средняя плотность Солнца составляет 1410 кг/м<sup>3</sup>, Луны — 3340 кг/м<sup>3</sup>, Земли — 5510 кг/м<sup>3</sup>, наибольшая плотность металлов (осмия) — 22 500 кг/м<sup>3</sup>, вещества атомных ядер — 10<sup>17</sup> кг/м<sup>3</sup>, и, наконец, плотность нейтронных звезд может достигать 10<sup>20</sup> кг/м<sup>3</sup>.

Значения (в порядке их возрастания) плотности некоторых широко используемых веществ и материалов приведены в табл. В-1.

В ряде отраслей науки и техники для характеристики вещества применяют *относительную плотность*, которая представляет собой отношение плотности рассматриваемого вещества к плотности другого (условного) вещества при определенных физических условиях и, следовательно, является безразмерной величиной.

В качестве условного вещества для определения плотности жидких и твердых веществ обычно принимают дистиллированную воду. Относительную плотность газов выражают по отношению к сухому воздуху, кислороду или водороду, взятым при тех же условиях, что и рассматриваемый газ, или в нормальном состоянии (см. далее).

Относительную плотность можно также рассматривать как отношение массы данного вещества к массе условного вещества, взятого в том же объеме при определенных условиях.

Относительную плотность будем обозначать буквой  $\rho$  с двумя дополнительными индексами: вверху и внизу. Верхнее число показывает температуру, при которой определена плотность исследуемого вещества, нижнее —

Таблица В-1

Плотность  $\rho_{20}$ , кг/м<sup>3</sup>, некоторых веществ и материалов при давлении 760 мм рт. ст. [101 325 Па] [135, 136]

Наименование веществ материалов	$\rho_{20}$	Наименование веществ материалов	$\rho_{20}$
<i>Газы и пары</i>			
Водород Н <sub>2</sub>	0,0837	Этиловый спирт	789,3
Гелий He	0,166	Ацетон С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub> О	791
Метан СН <sub>4</sub>	0,6679	Скипидар	865
Аммиак NH <sub>3</sub>	0,7184	Бензол	880
Водяной пар Н <sub>2</sub> О	0,7496	Растительные масла	914—962
Неон Ne	0,837	Вода Н <sub>2</sub> О	998,2
Ацетилен С <sub>2</sub> Н <sub>2</sub>	1,091	Уксусная кислота С <sub>2</sub> Н <sub>4</sub> О <sub>2</sub>	1049
Оксись углерода СО	1,165	Тяжелая вода	1105
Азот N <sub>2</sub>	1,166	Этиленгликоль	1113
Этилен С <sub>2</sub> Н <sub>4</sub>	1,174	Глицерин С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> О <sub>3</sub>	1260
Воздух (сухой)	1,205	Аномальная (сверхплотная) вода	1400
Оксись азота NO	1,248	Хлороформ СНСl <sub>3</sub>	1489
Кислород О <sub>2</sub>	1,331	Азотная кислота ННО <sub>3</sub>	1513
Сероводород Н <sub>2</sub> S	1,434	Четыреххлористый углерод ССl <sub>4</sub>	1594
Хлористый водород HCl	1,528	Серная кислота Н <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1831
Аргон Ar	1,664	Едкий натр NaOH	2130
Двуокись углерода (углекислый газ) СО <sub>2</sub>	1,842	Бромформ СНBr <sub>3</sub>	2891
Этиловый спирт С <sub>2</sub> Н <sub>5</sub> ОН	1,903	Ртуть	13546
Бутан С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	2,519	<i>Твердые вещества и материалы (средние значения)</i>	
Двуокись серы (сернистый газ) SO <sub>2</sub>	2,727	Пробка	240
Хлор Cl <sub>2</sub>	2,995	Древесина (сухая): березы	650
Криптон Kr	3,460	дуба	750
Ксенон Xe	5,452	Калий	860
Радон Rn	9,078	Парафин	890
<i>Жидкости</i>			
Водород: —240,6°C	43,2	Лед (0°C)	900
—258,3°C	76,3	Воск (пчелиный)	960
Гелий: —268,4°C	113,9	Натрий	972
—270,8°C	146,9	Эбонит	1150
Кислород: —120,4°C	603,2	Текстолит	1350
—210,4°C	1274,6	Песок (сухой)	1400
Хлор: —100°C	1717	Резина	1550
Двуокись углерода: —5,8°C	960,4	Магний	1740
Бензин	710	Бетон	2150
Этиловый эфир С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub> О	714	Тефлон (волокно)	2300
		Фарфор	2350
		Графит, стекло	2500

Продолжение табл. В-1

Наименование веществ материалов	$\rho_{20}$	Наименование веществ материалов	$\rho_{20}$
Гранит	2600	Железо	7874
Алюминий	2700	Бронза	8800
Дюралюминий	2790	Медь	8920
Слюда	2900	Свинец	11340
Корунд	4000	Тантал	16600
Олово (серое)	5750	Вольфрам, золото	19300
Чугун (серый)	7100	Платина	21450
Сталь (углеродистая)	7750	Иридий	22420

Примечание. Для сжиженных газов указана температура, соответствующая равновесному состоянию „жидкость—пар“.

температуру воды, к плотности которой отнесена плотность данного вещества. Например,  $\rho_{15}^{20}$  означает, что плотность вещества, измеренная при 20°C, отнесена к плотности воды при 15°C.

Разумеется, относительная плотность одного и того же вещества имеет различные числовые значения в зависимости от того, при какой температуре плотность воды принята за условную единицу.

Относительную плотность жидких и твердых веществ принято выражать отношением плотности вещества при нормальной температуре (20°C по ГОСТ 9249-59) к плотности дистиллированной воды при температуре 4°C. При таком условии относительную плотность обозначают  $\rho_4^{20}$ . С достаточной точностью плотность воды при 4°C

можно принять равной 1 г/см<sup>3</sup>, т. е. относительная плотность вещества численно совпадает с его плотностью  $\rho_{20}$  при 20°C, выраженной в граммах на кубический сантиметр.

Исключение составляет морская вода, относительную плотность которой выражают как отношение плотности при температуре 17,5°C к плотности дистиллированной воды при 17,5°C. Следовательно, относительная плотность морской воды обозначается так:  $\rho_{17,5}^{17,5}$ .

Выше было указано общее правило пересчета плотности, выраженной в одной единице, на плотность, выраженную в другой единице. Решим ту же задачу в приложении к относительной плотности.

Пусть известна плотность жидкости при температуре  $t$ , отнесенная к плотности воды при температуре  $t_1$ , т. е.  $\rho_{t_1}^t$ . Требуется определить плотность данной жидкости при той же температуре  $t$  по отношению к плотности воды при температуре  $t_2$ , т. е.  $\rho_{t_2}^t$ .

В соответствии с общим правилом [формула (В-3)] можно написать пропорцию

$$\rho_{t_2}^t : \rho_{t_1}^t = \rho_{вт_1} : \rho_{вт_2},$$

где  $\rho_{вт_1}$  и  $\rho_{вт_2}$  — значения плотности воды при температуре соответственно  $t_1$  и  $t_2$ , отсюда получаем требуемую формулу пересчета

$$\rho_{t_2}^t = \frac{\rho_{вт_1}}{\rho_{вт_2}} \rho_{t_1}^t. \quad (\text{В-4})$$

Значения плотности дистиллированной воды, соответствующей требованиям ГОСТ 6709-72, в зависимости от температуры указаны в приложении 1.

Используя формулу (В-4), можно по значению  $\rho_{t_1}^t$  определить относительную плотность  $\rho_4^{20}$  и численно равное ей значение  $\rho_{20}$ , выраженное в г/см<sup>3</sup>.

Плотность и удельный вес  $\gamma$  вещества связаны между собой таким же соотношением, как масса и вес:

$$\gamma = a\rho g, \quad (\text{В-5})$$

где  $g$  — местное ускорение свободного падения;  $a$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц рассматриваемых величин.

В то время как плотность тела не зависит от его местонахождения на поверхности Земли, удельный вес изменяется в зависимости от того, в какой точке земного шара находится это тело (на территории СССР — более чем на 0,3%). Поэтому удельный вес не является справочной величиной.

Плотность вещества, как правило, уменьшается с ростом температуры (вследствие теплового расширения) и увеличивается с повышением давления. Исключение составляет вода — ее плотность имеет максимум при 4°C\*

\* Точнее, максимум плотности (999,9720 кг/м<sup>3</sup>) соответствует  $t = 3,98^\circ\text{C}$  [278].

и уменьшается как с повышением, так и с понижением температуры. Уменьшение плотности при температуре ниже 4°C объясняется тем, что увеличивается число ультрамикросталликов, обладающих той же структурой, что и лед, т. е. меньшей плотностью, чем жидкая вода, так как во льду молекулы в среднем находятся дальше одна от другой, чем в воде.

При агрегатных превращениях вещества плотность изменяется скачкообразно, причем при переходе из жидкого состояния в твердое плотность обычно растет; однако существует и аномалия: например у воды, кремния, германия, галия и чугуна плотность уменьшается при переходе в твердое состояние.

Зависимость плотности от температуры при постоянном давлении в общем случае выражается уравнением

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \beta(t_2 - t_1)}, \quad (\text{В-6})$$

или, если пренебрегать малыми членами, начиная с  $\beta^2$ ,

$$\rho_2 = \rho_1 [1 - \beta(t_2 - t_1)], \quad (\text{В-7})$$

где  $\rho_1$  — плотность при температуре  $t_1$ ;  $\rho_2$  — плотность при температуре  $t_2$ ;  $\beta$  — средний коэффициент объемного теплового расширения в интервале от  $t_1$  до  $t_2$ .

Численно коэффициент  $\beta$  совпадает с относительным изменением плотности при изменении температуры на 1°C, т. е.

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P,$$

где  $P$  — давление.

Так, при комнатной температуре плотность воды с возрастанием температуры на 1°C уменьшается примерно на 0,02% ( $\beta = 2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). Коэффициент  $\beta$  большинства жидкостей в 2—6 раз больше коэффициента расширения воды, причем на каждый 1°C он растет примерно на 1%. Плотность твердых веществ обычно изменяется в зависимости от температуры значительно меньше, чем плотность жидкостей.

Значения коэффициента  $\beta$  для некоторых веществ приведены в табл. В-2.

У многих жидкостей, в том числе нефтепродуктов, не содержащих парафина (например, у бензина, керосина), наблюдается линей-

ная зависимость плотности от температуры, так что для них справедливо соотношение

$$\frac{\rho_1 - \rho_2}{t_2 - t_1} = \alpha, \quad (B-8)$$

где  $\alpha$  — постоянная для данной жидкости величина, равная тангенсу угла наклона (к оси температур) прямой линии, выражающей зависимость плотности от температуры.

Из соотношения (B-8) находим:

$$\rho_2 = \rho_1 - \alpha(t_2 - t_1). \quad (B-9)$$

Величина  $\alpha$ , выражаемая в  $\text{г}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ , представляет собой среднюю температурную поправку к плотности, показывающую, насколько изменяется плотность данной жидкости при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$ .

Сравнивая выражения (B-7) и (B-9), получаем, что приближенно

$$\alpha = \rho_1 \beta. \quad (B-10)$$

Как видим, средняя температурная поправка в некотором интервале температур равна произведению плотности жидкости на средний коэффициент объемного расширения в том же интервале температур.

Для пересчета плотности  $\rho_t$  жидкости, измеренной при некоторой температуре  $t$ , на плотность  $\rho_{20}$  при нормальной температуре служит следующая формула, полученная из уравнения (B-9):

$$\rho_{20} = \rho_t - \alpha(20 - t), \quad (B-11)$$

где  $\rho_{20}$  и  $\rho_t$  выражены в  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Значения  $\alpha$  для нефтепродуктов приведены в ГОСТ 3900-47\*.

При пользовании формулами (B-9) и (B-11) следует иметь в виду, что, поскольку значения поправок являются средними, пересчеты по формулам могут дать значительные погрешности, если разность температур  $t_1$  и  $t_2$  велика.

В особенности большие погрешности в этом случае получаются при приведении к нормальной температуре плотности, измеренной при другой температуре. Так, например, пересчет плотности бензина или керосина, определенной при температуре  $-20^\circ\text{C}$ , к значению при температуре  $+20^\circ\text{C}$  дает погрешность порядка 0,25%; для масел погрешность пересчета еще больше и в том же диапазоне температур может доходить до 0,5%.

Поэтому для определения плотности с большей точностью формулу (B-9) рекомендуется применять только в тех случаях, когда температура измерения  $t_1$  отличается от температуры  $t_2$ , при которой требуется определить плотность, не более чем на  $\pm 10^\circ\text{C}$ .

В жидкостях молекулы расположены очень близко друг от друга, благодаря чему внутреннее (молекулярное) давление жидкости весьма велико (подробнее см. далее). Большое внутреннее давление является причиной практически малой сжимаемости жидкости, а следо-

\* Точность температурной поправки может быть существенно повышена, если поправку определять в функции двух параметров нефтепродуктов — плотности и температуры кипения [77].

Таблица B-2

Значения коэффициента объемного теплового расширения некоторых веществ и материалов

Вещество или материал	Температура, $^\circ\text{C}$	$\beta \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	Источник
Алюминий	0—100	70	[102]
Бензин	20—60	1500	[142]
Бензол	10—80	1229	[135]
Вода	10—30	200	[135]
Вольфрам	—100—0	12	[102]
	0—1000	14	[102]
	1000—2000	18	[102]
Глицерин	0—40	500	[135]
Графит (   оси)	—100—700	50	[102]
Инвар (отожженный)	25—100	11	[102]
	100—200	25	[102]
	200—300	42	[102]
	300—700	54	[102]
Керосин	0—40	955	[142]
Кремний	—50—100	7	[102]
	100—800	14	[102]
Латунь	20	60	[142]
Медь	0—100	50	[102]
Молибден	—100—0	14	[102]
	0—1000	18	[102]
Платина	—100—0	26	[102]
	0—500	28	[102]
Ртуть	—39—0	182	[145]
	0—100	181	[145]
Сталь:			
углеродистая	0—100	30	[102]
хромоникелевая	0—100	44	[102]
Стекло:			
кварцевое (плавленый кварц)	—50—0	0,9	[102]
	0—100	1,5	[102]
	100—300	1,9	[102]
иенское 16'''	0—100	24	[135]
иенское 59'''	0—100	17	[135]
пирекс	0—100	9	[142]
химическое посудное № 23	0—100	27	[142]
термометрическое 360 (ГОСТ 1224-71)	0—100	25	[142]
Титан	—100—100	23	[102]
	975	36	[102]
Фарфор	20—1400	16	[135]
Этиленгликоль	10—55	566	[135]
Этиловый спирт	0—40	1100	[142]

вательно, и малого изменения ее плотности под действием внешнего давления. Так, например, по экспериментальным данным [124, 145] при повышении давления до 4000 кгс/см<sup>2</sup> (392,3 МПа) плотность возрастает примерно на 13% у воды, на 16% у спирта и 1,5% у ртути.

Если обозначить через  $\rho_1$  и  $\rho_2$  плотность жидкости соответственно при давлениях  $P_1$  и  $P_2$ , то при постоянной температуре

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \beta_P (P_2 - P_1)],$$

где  $\beta_P$  — средний изотермический коэффициент сжимаемости в интервале давлений  $P_1$ — $P_2$ , равный отношению изменению плотности на единицу давления:

$$\beta_P = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T.$$

Так, для воды при температуре 20°C в диапазоне давлений 1—25 кгс/см<sup>2</sup> (0,1—2,5 МПа) коэффициент  $\beta_P = 49 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/кгс, т. е. повышение давления на 1 кгс/см<sup>2</sup> (0,1 МПа) вызывает увеличение плотности примерно на 0,005%. У большинства жидкостей коэффициент сжимаемости находится приблизительно в диапазоне (20—200)  $10^{-6}$  см<sup>2</sup>/кгс; исключение составляет ртуть ( $\beta_P = 4 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/кгс). Коэффициент сжимаемости уменьшается с ростом давления (например, у воды примерно на 0,02% на 1 кгс/см<sup>2</sup>) и понижением температуры.

Следует заметить, что приведенное выше уравнение влияния сжимаемости можно применять лишь для приближенного определения плотности. Например, при давлении 40 кгс/см<sup>2</sup> (4 МПа) и температуре 20°C плотность этилового спирта составляет по расчету 802,6 кг/м<sup>3</sup>, а по результатам измерений — 807,6 кг/м<sup>3</sup>.

Рассмотренные выше данные, характеризующие зависимость плотности от температуры и давления, позволяют сделать заключение о том, что температура оказывает во много раз большее влияние на плотность, чем давление, однако и последним не всегда можно пренебречь. Допускаемые отклонения температуры и давления определяются, с одной стороны, необходимой точностью значения плотности, а с другой, — значениями коэффициентов теплового расширения и сжимаемости контролируемого вещества в рассматриваемых условиях. Следовательно, эта задача должна решаться конкретно для каждого случая; в качестве примера приводится табл. В-3, которая справедлива для измерения плотности (близкой к 1000 кг/м<sup>3</sup>) вещества с коэффициентами  $\beta = 2 \cdot 10^{-3}$  °C<sup>-1</sup> и  $\beta_P = 1 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/кгс.

Допускаемые отклонения температуры и давления

Погрешность значения плотности, определяемая единицами в значащих цифре	Допускаемые отклонения	
	температуры, °C	атмосферного давления, мм рт. ст.
4-й	±1	Практически не играют роли
5-й	±0,1	
6-й	±0,01	
7-й	±0,001	
8-й	±0,0001	
		±20
		±2

Плотность газов и паров зависит от температуры и давления в значительно большей степени, чем плотность жидких и твердых веществ.

Зависимость плотности идеального газа от абсолютного давления  $P$  и абсолютной температуры  $T$  характеризуется уравнением состояния газа (Менделеева — Клапейрона)

$$\rho = \frac{P\mu}{RT}, \quad (\text{В-12})$$

где  $\mu$  — молекулярная масса газа, кг/кмоль;  $R$  — универсальная газовая постоянная, равная 8314,3 Дж/(К·кмоль).

Для вычисления плотности реальных газов справедливы следующие уравнения (подробнее см. [115]): для сухого газа

$$\rho = \rho_n \frac{PT_n}{P_nTK}; \quad (\text{В-13})$$

для влажного газа

$$\rho = \rho_n \frac{(P - \varphi P_{в.п}) T_n}{P_nTK} + \varphi \rho_{в.п}. \quad (\text{В-14})$$

где  $\rho_n$  — плотность сухого газа в нормальном состоянии (нормальная температура  $T_n = 293,15$  К, нормальное давление  $P_n = 760$  мм рт. ст. = 10 332 кгс/м<sup>2</sup> = 101 325 Па);  $K$  — коэффициент сжимаемости, характеризующий отклонение данного реального газа от уравнения состояния идеальных газов;  $\varphi$  — относительная влажность газа при  $P$  и  $T$  (в долях единицы);  $P_{в.п}$  — максимальное возможное давление водяного пара при температуре  $T$  (определяется по таблицам);  $\rho_{в.п}$  — максимальная воз-

можная плотность водяного пара при  $P$  и  $T$  (определяется по таблицам).

Для сухих газов принимают среднее значение  $\beta = 366 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Плотность смеси сухих газов

$$\rho = a_1 \rho_1 + a_2 \rho_2 + \dots + a_n \rho_n, \quad (\text{B-15})$$

когда состав смеси задан по объему, или

$$\rho = \frac{1}{b_1/\rho_1 + b_2/\rho_2 + \dots + b_i/\rho_i}, \quad (\text{B-16})$$

когда состав задан по массе. Здесь  $a_i$  и  $b_i$  — соответственно объемная и массовая концентрации данного компонента в смеси (в долях единицы);  $\rho_i$  — плотность компонента при давлении и температуре смеси.

Плотность двухкомпонентных растворов при прочих неизменных условиях зависит только от содержания в них растворенного вещества. Следовательно, чтобы определить концентрацию раствора, химический состав которого известен, достаточно измерить его плотность. Обычно для этой цели используют приборы для измерения плотности, шкалы которых градуированы в значениях концентрации.

Если в жидкости растворено некоторое количество жидкого или твердого вещества, то *концентрацией* раствора принято называть процентное содержание растворенного вещества в определенном количестве раствора. Концентрация исчисляется по отношению к общей массе раствора (*массовая* концентрация) или к его общему объему (*объемная* концентрация) и выражается в процентах (или долях единицы).

Массовая концентрация раствора может быть вычислена непосредственно, если известны массы растворимого вещества и растворителя, взятые для составления раствора. Так, 60 г безводного спирта, смешанные с 40 г воды, дадут раствор, концентрация которого составляет  $\frac{60 \cdot 100}{60 + 40} = 60\%$  по массе.

Расчет объемной концентрации во многих случаях более сложен, так как растворение некоторых веществ (например, спирта в воде) сопровождается уменьшением их общего объема, т. е. непосредственный расчет объемной концентрации по исходным объемам смешиваемых жидкостей дает результат, уменьшенный по сравнению

с действительной концентрацией. Поэтому объемную концентрацию раствора следует вычислять по массовой.

Выведем формулу, устанавливающую зависимость между массовой и объемной концентрациями. Пусть имеется раствор концентрации  $p$ , % по массе, чему соответствует концентрация  $q$ , % по объему при  $20^\circ\text{C}$ . Плотность растворяемой жидкости при  $20^\circ\text{C}$  обозначим через  $\rho_{ж20}$ , а раствора при данной концентрации —  $\rho_{20}$ . По условию

$$p = \frac{m_{ж}}{m} 100; \quad (\text{B-17})$$

$$q = \frac{V_{ж20}}{V_{20}} 100, \quad (\text{B-18})$$

где  $m$  и  $m_{ж}$  — масса раствора и растворяемой жидкости соответственно;  $V_{20}$  и  $V_{ж20}$  — объем при  $20^\circ\text{C}$  раствора и растворяемой жидкости соответственно.

Разделяя почленно выражения (B-17) и (B-18) и учитывая, что  $m_{ж}/V_{ж20} = \rho_{ж20}$  и  $m/V_{20} = \rho_{20}$ , находим:

$$\frac{p}{q} = \frac{\rho_{ж20}}{\rho_{20}}. \quad (\text{B-19})$$

Таким образом, для пересчета значений концентрации должны быть известны числовые значения плотности раствора при различных концентрациях.

В качестве примера рассмотрим пересчет концентрации водно-спиртового раствора. Так как плотность безводного этилового спирта, соответствующего ГОСТ 5962-67,  $\rho_{с20} = 789,3 \text{ кг/м}^3$  (см. табл. B-1), то из соотношения (B-19) получим:

$$p = \frac{789,3}{\rho_{20}} q; \quad (\text{B-20})$$

$$q = \frac{\rho_{20}}{789,3} p. \quad (\text{B-21})$$

Как видим, для пересчета объемной концентрации водно-спиртового раствора в массовую и обратно необходимо знать плотность раствора в зависимости от концентрации. В СССР принята таблица плотностей водно-спиртовых растворов [141], разработанная в 1924—1927 гг. комиссией бывшей Главной палаты мер и весов по материалам экспериментальных исследований Д. И. Менделеева.

При измерении плотности жидкостей разными методами необходимо учитывать так называемые капиллярные явления. Рассмотрим вкратце существо этих явлений.

Как известно, между молекулами всякого тела существует взаимное притяжение (сцепление), причем действие сил, вызывающих это явление, проявляется на очень малых расстояниях. Каждая молекула притяги-



вают к себе все окружающие ее молекулы, расположенные внутри сферы молекулярного действия; эта сфера описывается радиусом, равным наибольшему расстоянию, на котором еще обнаруживаются силы сцепления. Радиус молекулярного действия в жидкости равен примерно 0,001 мкм.

Если молекула жидкости находится на таком расстоянии от поверхности, что сфера молекулярного действия помещается целиком в жидкости, то данная молекула испытывает одинаковое со всех сторон притяжение окружающих ее молекул и равнодействующая этих сил сводится к нулю.

В ином положении оказываются молекулы, лежащие в поверхностном слое, толщина которого меньше радиуса молекулярного действия. В этом случае сфера действия молекулы лишь частично расположена внутри жидкости, т. е. над данной молекулой находится меньше молекул, чем под ней<sup>1</sup>, в результате чего на нее действует притягивающая сила, направленная внутрь жидкости, перпендикулярно ее поверхности.

Таким образом, молекулы поверхностного слоя толщиной, равной радиусу молекулярного действия, притягиваются к внутренним слоям жидкости, т. е. поверхностный слой оказывает на всю жидкость давление. Это давление, называемое молекулярным давлением, направлено перпендикулярно поверхности. Молекулярное давление в жидкостях весьма велико; для воды, например, оно достигает приблизительно 10 000 кгс/см<sup>2</sup> (1000 МПа).

Взаимное притяжение молекул не только обуславливает давление поверхностного слоя на остальную жидкость, но стремится также уменьшить поверхность жидкости, т. е. вызывает силу, направленную вдоль поверхности; эта сила называется *силой поверхностного натяжения*. Равновесие жидкости устанавливается при таком расположении молекул, когда на поверхности находится наименьшее возможное число их, т. е. когда свободная поверхность жидкости имеет наименьшую площадь и создает силу натяжения вдоль поверхности.

Сила поверхностного натяжения, действующая в данной точке линии, взятой на поверхности жидкости, расположена в плоскости, касательной к поверхности в этой точке, и перпендикулярна указанной линии. Силу, при-

<sup>1</sup> Действием молекулярных сил газа (пара) можно пренебречь ввиду их малости.

ложенную к единице длины произвольной линии, проведенной на свободной поверхности жидкости, называют *коэффициентом поверхностного натяжения* или кратко — *поверхностным натяжением* данной жидкости.

Поверхностное натяжение принято обозначать буквой  $\sigma$ ; его выражают в дин/см или в Н/м; причем 1 Н/м = 1000 дин/см.

Если единицу поверхностного натяжения умножить и разделить на одну и ту же единицу длины, то легко увидеть, что поверхностное натяжение численно равно работе, которую нужно произвести, чтобы увеличить свободную поверхность жидкости на единицу.

Поверхностное натяжение зависит от природы жидкости, ее химической чистоты, давления и температуры<sup>1</sup>. Оно пропорционально четвертой степени разности плотностей жидкости и ее насыщенного пара.

Различие в поверхностном натяжении жидкостей объясняется различием в силах сцепления у разных молекул. У легко испаряющихся жидкостей (эфира, спирта) молекулярное взаимодействие, а следовательно, и поверхностное натяжение меньше, чем у нелетучих жидкостей. Так, при температуре 20°C поверхностное натяжение (на границе с воздухом), Н/м, равно для этилового спирта  $22,3 \cdot 10^{-3}$ , керосина  $26,9 \cdot 10^{-3}$ , бензола  $28,9 \cdot 10^{-3}$ , серной кислоты (97%-ной)  $55,3 \cdot 10^{-3}$ , этиленгликоля  $46,1 \cdot 10^{-3}$ , глицерина  $62,4 \cdot 10^{-3}$ , воды  $72,75 \cdot 10^{-3}$ , ртути  $475 \cdot 10^{-3}$  [135].

Особенно мало поверхностное натяжение у сжиженных газов: так, например, жидкий водород имеет поверхностное натяжение  $2,3 \cdot 10^{-3}$  Н/м (при температуре  $-255^\circ\text{C}$ ), жидкий гелий  $0,10 \cdot 10^{-3}$  Н/м (при  $-269^\circ\text{C}$ ). У расплавленных металлов поверхностное натяжение, наоборот, очень велико: у расплавленного железа ( $1267^\circ\text{C}$ )  $936 \cdot 10^{-3}$  Н/м, меди ( $1140^\circ\text{C}$ )  $1120 \cdot 10^{-3}$  Н/м, платины ( $2000^\circ\text{C}$ )  $1819 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

При повышении температуры поверхностное натяжение жидкости линейно уменьшается по закону

$$\sigma = \frac{k}{v_m^{2/3}} [(T_k - 6) - T],$$

где  $v_m$  — молярный объем жидкости;  $T$  — абсолютная температура;  $T_k$  — критическая температура;  $k$  — постоянная, зависящая от при-

<sup>1</sup> Расчетные методы приближенного определения поверхностного натяжения изложены в [140].

роды жидкости (для многих жидкостей она равна 2,12, для воды 1, для спирта 1,25).

Например, с ростом температуры от 20 до 80°C поверхностное натяжение нефти на границе с воздухом уменьшается приблизительно на 24% [58].

Повышение давления, равно как и примесь растворимых в жидкости веществ, также приводит к уменьшению поверхностного натяжения. Так, при росте давления до 45 кгс/см<sup>2</sup> (4,5 МПа) поверхностное натяжение нефти снижается на 20% [58].

Рассмотрим силы, приложенные к молекуле жидкости на поверхности у стенки сосуда (рис. В-1). Если пренебречь весьма незначительными силами притяжения со стороны молекул воздуха, то на молекулу А действуют две силы:

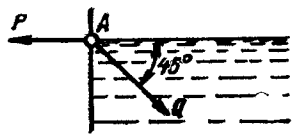


Рис. В-1. Силы сцепления, действующие на молекулу у стенки сосуда.

сила  $Q$  — равнодействующая сил сцепления молекул жидкости между собой, направленная внутрь массы жидкости под углом 45°, и сила  $P$  — равнодействующая сил притяжения молекулы А молекулами стенки, которая направлена перпендикулярно ей.

В зависимости от соотношения сил  $P$  и  $Q$  их равнодействующая  $R$  может быть направлена либо в сторону стенки сосуда (рис. В-2,а), либо в сторону жидкости

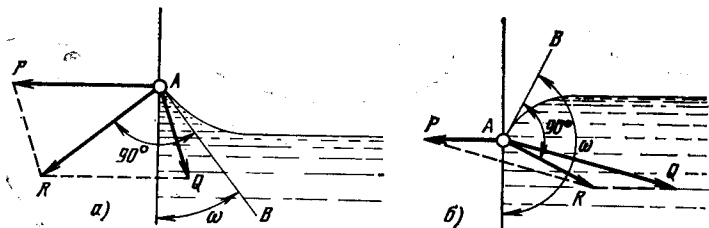


Рис. В-2. Образование мениска. а — вогнутого; б — выпуклого.

(рис. В-2,б). Это относится к любой молекуле в поверхностном слое, толщина которого не больше радиуса молекулярного действия. Так как равновесие жидкости наступает тогда, когда в каждой точке поверхности равнодействующая всех сил в этой точке направлена перпендикулярно поверхности, то у стенки сосуда поверхность жидкости изгибается, поднимаясь над общим го-

ризонтальным уровнем (рис. В-2,а) или опускаясь ниже его (рис. В-2,б). Искривленная поверхность жидкости называется *мениском*<sup>1</sup>.

Вогнутый мениск (рис. В-2,а) получается тогда, когда силы сцепления молекул жидкости меньше, чем силы сцепления жидкости с твердым телом. В этом случае говорят, что жидкость смачивает данное твердое тело; например, чистое стекло смачивается водой, спиртом и другими жидкостями. Если же жидкость не смачивает твердое тело, т. е. силы сцепления молекул жидкости между собой превышают силы сцепления между молекулами жидкости и твердого тела, то образуется выпуклый мениск (рис. В-2,б). Такой мениск получается, например, у ртути, налитой в стеклянный сосуд, и у воды по отношению к покрытому жиром стеклу.

С внешней стороны явления смачивания и несмачивания проявляются следующим образом. Когда жидкость смачивает твердое тело, она пристает к нему. Капля такой жидкости расплывается по поверхности тела; твердое тело, опущенное в жидкость, а затем вынутое из нее, оказывается покрытым тонким слоем жидкости. Несмачивающая жидкость не пристает к твердому телу: капля жидкости не расплывается по поверхности тела, приобретая выпуклую форму; если в жидкость погрузить и затем вынуть твердое тело, то на нем не будет слоя жидкости.

Угол между касательной  $AB$  к поверхности жидкости (т. е. к кривой мениска) в точке соприкосновения поверхности со стенкой сосуда и погруженной частью стенки называется *краевым углом*  $\omega$ . Краевой угол всегда отсчитывается внутрь массы жидкости.

При смачивании жидкостью стенок сосуда краевой угол острый (рис. В-2,а), при несмачивании — тупой (рис. В-2,б). Чем лучше смачиваемость, тем меньше краевой угол. При полном смачивании жидкостью стенок краевой угол равен нулю.

Выше было рассмотрено молекулярное давление под плоской поверхностью жидкости. Когда поверхность искривлена, жидкость подвержена дополнительному давлению. Дополнительное давление направлено вниз (внутри жидкости) и имеет положительный знак, если поверхность жидкости выпукла, или направлено вверх (в пространство вне жидкости) и имеет отрицательный знак, если поверхность вогнута. Следовательно, молекулярное давление при вогнутом мениске меньше, а при выпуклом — больше, чем на плоской поверхности. В случае сферической поверхности радиусом  $R$  добавочное молекулярное давление  $P$  определяется по формуле Лапласа

$$P = \frac{2\sigma}{R}. \quad (\text{В-22})$$

Поднятие или опускание жидкости при соприкосновении ее с твердым телом особенно проявляется в трубках весьма малого

<sup>1</sup> По-гречески означает «полумесяц».

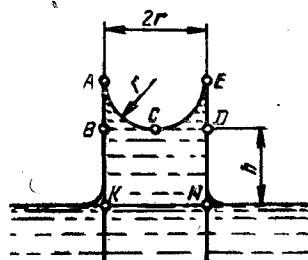


Рис. В-3. Поднятие жидкости в капиллярной трубке.

указано выше, молекулярное давление под поверхностью мениска будет меньше, чем под плоской поверхностью жидкости в сосуде, на значение  $P=2\sigma/r$ . Под действием этой разности давлений жидкость в трубке поднимется на такую высоту  $h$ , при которой недостаток молекулярного давления  $P$  в трубке уравнивается гидростатическим давлением поднятого столба. Отсюда получаем следующее условие равновесия:

$$\rho gh = \frac{2\sigma}{r},$$

где  $\rho$  — плотность жидкости.

Тогда высота поднятия жидкости определится из формулы

$$h = \frac{2\sigma}{r\rho g}. \quad (\text{В-23})$$

Как видим, высота капиллярного поднятия жидкости прямо пропорциональна поверхностному натяжению и обратно пропорциональна радиусу трубки и плотности жидкости. По этой же формуле можно вычислить глубину опускания жидкости в капиллярной трубке относительно уровня в сосуде, когда жидкость не смачивает стенки трубки.

Величина  $hr=2\sigma/\rho g$  не зависит от радиуса капилляра и определяется только молекулярной природой жидкости, в связи с чем называется *капиллярной постоянной*. В технике измерения плотности принято называть капиллярной постоянной величину  $hr/2$ , условно обозначаемую буквой  $a$ , т. е.

$$a = \frac{\sigma}{\rho g}. \quad (\text{В-24})$$

Следовательно, капиллярная постоянная численно равна половине высоты поднятия жидкости в полностью смачиваемой трубке радиусом 1 мм. Капиллярную постоянную обычно выражают в квадратных миллиметрах, для чего необходимо умножить на 100 значение, найден-

ное по формуле (В-24), если  $\sigma$  выражено в дин/см,  $\rho$  — в г/см<sup>3</sup>,  $g$  — в см/с<sup>2</sup>.

Различные методы измерения поверхностного натяжения (капиллярной постоянной) рассмотрены, например, в работах [4, 163, 215].

Значения капиллярной постоянной некоторых жидкостей приведены в [62]. Капиллярная постоянная воды равна 7,43 мм<sup>2</sup>.

Следует иметь в виду, что капиллярная постоянная уменьшается с повышением температуры.

Как видно из уравнения (В-1), абсолютное измерение плотности требует прямых измерений массы и объема вещества. Если при этом массу непосредственно определяют взвешиванием, то такие методы измерения плотности условимся называть *объемно-весовыми*. Для измерения взвешиваемого объема жидкости или газа обычно используют специальные сосуды — пикнометры и пьезометры. Измерение объема твердых тел (веществ) связано с определенными трудностями. Измерить объем методами линейных измерений можно лишь у твердых тел, да и то у таких, которые имеют геометрически простую и правильную форму. Объем твердого тела неправильной формы или сыпучего твердого вещества определяют методом вытеснения, т. е. путем измерения приращения объема жидкости, вызываемого полным погружением в нее испытуемого вещества (тела); этот объем в свою очередь можно измерить объемным или весовым методом. Объем твердого вещества определяют также по изменению давления газа, поданного в закрытый сосуд до и после введения в него вещества. Группа указанных выше приборов для измерения объема твердых тел получила название *объемомеров*.

Большая группа методов, которые мы будем называть *поплавково-весовыми*, основана на определении выталкивающей силы, действующей на испытуемое тело или специальное вспомогательное тело (поплавок); эта сила в соответствии с законом Архимеда прямо пропорциональна плотности среды, в которую погружено тело. Сюда относятся методы ареометра, гидростатического взвешивания, поплавковый, флотационный.

Следующую группу образуют гидростатические методы измерения, которые базируются на зависимости статического давления столба жидкости или газа постоянной высоты от их плотности.

В отдельную группу можно объединить гидродинамические методы, связанные с зависимостью от плотности таких физических величин, как скорость истечения струи жидкости или газа из отверстия, сила удара струи о преграду, скорость падения тела в жидкости, энергия потока вещества, динамическое давление и др.

Большое развитие получают новые методы измерений, основанные на использовании различных физических явлений и величин, которые однозначно зависят от плотности. Сюда относятся, например, зависимость от плотности следующих физических величин: ослабления радиоактивного излучения, которым «просвечивают» вещество; скорости распространения звука в веществе; частоты и амплитуды вибраций вспомогательного тела, соприкасающегося с испытуемым веществом; параметров вихрей, образующихся в потоке жидкости или газа и др.

В настоящей книге рассмотрены только основные методы и приборы, достаточно широко применяемые в различных областях техники или являющиеся перспективными.

## Часть первая

### Плотномеры для дискретных измерений

#### Глава первая

#### АРЕОМЕТРЫ ЧАСТИЧНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

##### 1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО АРЕОМЕТРОВ

Простейшим и наиболее распространенным является метод измерения плотности жидкостей и концентрации растворов при помощи прибора, называемого *ареометром*<sup>1</sup>. Ареометр частичного погружения представляет собой вертикальное продолговатое полое тело, соединенное сверху с узким трубчатым стержнем, который снабжен шкалой.

При погружении в жидкость ареометр согласно закону Архимеда испытывает действие выталкивающей (подъемной) силы, равной весу вытесненной ареометром жидкости. По мере погружения ареометра увеличиваются объем и вес вытесненной им жидкости, т. е. возрастает выталкивающая сила, и в тот момент, когда эта сила становится равной весу всего ареометра, наступает состояние равновесия.

Глубина погружения, при которой ареометр приходит в равновесное состояние, зависит от плотности жидкости: чем больше плотность, тем меньше должна быть глубина погружения ареометра, чтобы вес жидкости, вытесненной его погруженной частью, стал равен общему весу ареометра; наоборот, чем меньше плотность жидкости, тем больше глубина погружения ареометра.

Таким образом, числовые значения плотности на шкале ареометра должны располагаться в возрастающем порядке сверху вниз, т. е. отметки, соответствующие меньшей плотности, должны находиться в верхней части шкалы, а отметки, соответствующие большей плотно-

<sup>1</sup> Слово «ареометр» образовано из греческих слов *araios* — жидкий и *metreo* — измеряю.

сти, — в нижней. То же относится и к ареометрам для измерения концентрации растворов, плотность которых растет с увеличением концентрации; у этих ареометров указанные на шкале значения концентрации возрастают сверху вниз. Плотность некоторых растворов (например, водно-спиртовых) увеличивается по мере уменьшения концентрации, поэтому числа на шкале соответствующего ареометра возрастают снизу вверх.

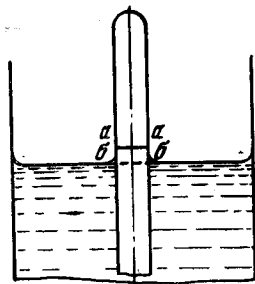


Рис. 1-1. Образование мениска вокруг стержня.

аа — верхний край мениска; бб — его нижний край.

Из сказанного выше следует, что шкала ареометра неравномерна: деление шкалы, т. е. расстояние между двумя смежными отметками, постепенно увеличивается снизу вверх — к концу стержня. Действительно, верхняя часть шкалы соответствует меньшей плотности, чем нижняя, т. е. отношение цены деления шкалы к плотности сверху больше, чем внизу; отсюда следует, что объем участка стержня ареометра, соответствующий цене деления, сверху должен составлять большую долю объема погруженной части ареометра, чем внизу. Кроме того, объем погруженной части растет по мере перемещения вдоль стержня снизу вверх. Таким образом, при постоянном диаметре стержня деление должно увеличиваться в направлении снизу вверх. Для получения приблизительно равномерной шкалы стержень должен быть выполнен коническим, расширяющимся снизу вверх (см., например, [244]).

Капиллярные явления приобретают особенное значение при ареометрических измерениях. Вокруг стержня ареометра, плавающего в жидкости, поверхность искривляется, и образуется мениск, который оказывает большое влияние на показания прибора. Так как преобладающее распространение получили стеклянные ареометры, а большинство жидкостей смачивает стекло, то в этих случаях образуется вогнутый мениск (рис. 1-1). Мениск<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Здесь и далее, где это необходимо, жидкость между мениском, горизонтальной плоскостью, касательной к нему, и поверхностью стержня условно (для краткости) также именуется мениском.

как бы прилипает к стержню ареометра, увеличивая его эффективную массу, отчего ареометр погружается в жидкость на большую глубину.

Мениск, представляющий собой некоторое количество жидкости, поднявшейся вдоль стержня ареометра, удерживается силой поверхностного натяжения, которая действует на линии соприкосновения жидкости со стержнем.

При полном смачивании стержня ареометра жидкостью сила поверхностного натяжения направлена вдоль стержня и равна произведению поверхностного натяжения  $\sigma$  на длину окружности стержня, т. е.  $\pi d \sigma$ , где  $d$  — диаметр стержня. Обозначая массу мениска через  $m_0$ , получаем уравнение равновесия

$$m_0 g = \pi d \sigma.$$

После подстановки значения  $\sigma$  из формулы (В-24) находим выражение для определения массы мениска:

$$m_0 = \pi d a \rho. \quad (1-1)$$

Определим массу мениска, который образуется вокруг стержня ареометра, погруженного в водный раствор серной кислоты. Диаметр стержня  $d=5$  мм, плотность раствора  $\rho_{20}=1190$  кг/м<sup>3</sup>.

По таблице в [62] находим капиллярную постоянную  $a=6,40$  мм<sup>2</sup>. Выразив  $d$  в метрах и  $a$  в метрах квадратных, по формуле (1-1) найдем:

$$m_0 = 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1190 \approx 120 \cdot 10^{-6} \text{ кг} = 0,12 \text{ г}.$$

Хотя масса мениска сравнительно с массой ареометра весьма мала, подсчитаем, насколько погрузится ареометр под действием мениска. Ареометр находится в равновесии в жидкости, когда его вес равен весу вытесненной жидкости; следовательно, вес жидкости в объеме той части стержня, которая погрузилась под действием мениска, равен весу мениска. Обозначив через  $H$  длину этой части стержня, запишем указанное условие в виде

$$m_0 g = \frac{\pi d^2}{4} H \rho g,$$

откуда искомая дополнительная глубина погружения ареометра

$$H = \frac{4m_0}{\pi d^2 \rho}. \quad (1-2)$$

Для условий предыдущего примера находим:

$$H = \frac{4 \cdot 120 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1190} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \text{ мм.}$$

Как видим, под действием мениска ареометр дополнительно погружается довольно значительно, так что влиянием мениска нельзя пренебречь.

Формулу (1-2) можно представить и в другом виде, если в нее подставить значение  $m_0$  из уравнения (1-1), тогда

$$H = \frac{4a}{d}. \quad (1-3)$$

Формула (1-3) подтверждает, что в двух жидкостях, имеющих одинаковую плотность, но различную капиллярную постоянную, один и тот же ареометр даст разные показания. Если  $a_1$  и  $a_2$  — капиллярные постоянные жидкостей, причем  $a_1 > a_2$ , то глубина дополнительного погружения ареометра под действием мениска в первой жидкости будет больше, чем во второй, и разность глубин согласно формуле (1-3) составит  $\frac{4}{d} (a_1 - a_2)$ . Так,

например, ареометр со стержнем диаметром 5 мм при одинаковой плотности воды ( $a_1 = 7,43 \text{ мм}^2$ ) и серновинного раствора ( $a_2 = 2,92 \text{ мм}^2$ ) погрузится в воду глубже, чем в раствор, на 3,6 мм.

Таким образом, в жидкости с большей капиллярной постоянной ареометр из-за большого погружения будет показывать меньшую, чем следует, плотность, так как значения плотности на шкале ареометра растут сверху вниз. Эта ошибка увеличивается с уменьшением диаметра стержня.

Рассмотрим силы, действующие на ареометр, плавающий в жидкости, и выведем уравнение равновесия ареометра, устанавливающее зависимость между основными размерами ареометра и плотностью жидкости.

Введем следующие дополнительные обозначения:  $V$  — объем ареометра;  $v$  — объем корпуса ареометра и части стержня до нижней отметки шкалы;  $l$  — расстояние от нижней отметки шкалы до уровня жидкости;  $S$  — площадь поперечного сечения стержня;  $L$  — длина окружности сечения стержня;  $m$  — масса ареометра;  $M$  — масса ареометра, определенная взвешиванием в воздухе;  $D$  — плотность воздуха.

Для равновесия ареометра в жидкости необходимо, чтобы существовало равенство между силами, погружающими ареометр в жидкость, и силами, выталкивающими его из жидкости. Допустим, что ареометр изготовлен из материала, который смачивается данной жидкостью (т. е. мениск вогнутый), и жидкость имеет ту температуру, для которой градуирован ареометр. Тогда

силы, погружающие ареометр в жидкость, складываются из веса ареометра  $G_a = mg$  и веса мениска  $G_m = La\rho g$

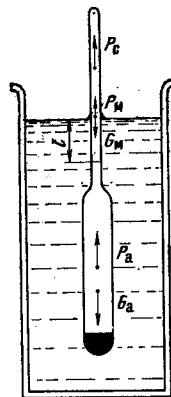


Рис. 1-2. Силы, действующие на ареометр.

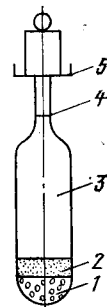


Рис. 1-3. Ареометр постоянного объема.

(рис. 1-2). Выталкивающая сила равна сумме следующих трех сил: веса жидкости в объеме погруженной части ареометра  $P_a = (v + lS)\rho g$ , веса воздуха в объеме погруженной части стержня  $P_c = (V - v - lS)Dg$ , веса воздуха в объеме мениска  $P_m = LaDg$ .

Условие равновесия ареометра запишется так:

$$m + La\rho = (v + ls)\rho + (V - v - lS)D + LaD,$$

или

$$m - VD + La(\rho - D) = (v + lS)(\rho - D).$$

Принимая во внимание, что разность  $m - VD$  представляет собой массу ареометра за вычетом массы воздуха в объеме ареометра, т. е. массу ареометра  $M$ , опре-

<sup>1</sup> Закон Архимеда относится и к телам, находящимся в газовой среде.

<sup>2</sup> Объем мениска определится делением массы мениска, выражаемой формулой (1-1), на плотность жидкости.

деленную взвешиванием в воздухе, получаем окончательное уравнение:

$$M + La(\rho - D) = (v + lS)(\rho - D). \quad (1-4)$$

В дальнейшем массу, определенную взвешиванием в воздухе, для краткости будем называть массой в воздухе.

Различают ареометры постоянного объема (переменной массы) и ареометры постоянной массы. Ареометр постоянного объема погружается в жидкость всегда на одну и ту же глубину, в то время как глубина погружения ареометра постоянной массы различна в зависимости от плотности испытуемой жидкости.

Ареометр постоянного объема (рис. 1-3) состоит из полого продолговатого металлического или стеклянного корпуса 3 цилиндрической формы, переходящего вверху в тонкий короткий стержень, на конце которого укреплена тарелка (чашка) 5 для накладывания груза (гирь). Для устойчивости корпус снабжен балластом 1, который фиксируется слоем связующего вещества 2. На стержне нанесена метка 4, до которой должен погружаться ареометр при определенной плотности жидкости и определенной массе гирь. О плотности исследуемой жидкости судят по массе груза, снятого или добавленного для того, чтобы ареометр погрузился до метки.

Уравнение равновесия ареометра в жидкости имеет вид (влиянием мениска и выталкивающей силы непогруженной части стержня пренебрегаем):

$$m + m_{г.ж} = V_{п}\rho,$$

где  $m$  — масса ареометра;  $m_{г.ж}$  — масса гирь;  $V_{п}$  — объем погруженной части ареометра (до метки) при температуре  $t$ , заранее определенный при помощи жидкости известной плотности (например, воды):

$$V_{п} = \frac{m + m_{г.в}}{\rho_{в}},$$

где  $m_{г.в}$  — масса гирь, погружающих ареометр (до метки) в воде плотностью  $\rho_{в}$  при температуре  $t$ .

Тогда искомая плотность жидкости

$$\rho = \frac{m + m_{г.ж}}{V_{п}}.$$

Для повышения чувствительности ареометра и уменьшения влияния поверхностного натяжения стержень рекомендуется выполнять весьма тонким, например из иглы диаметром 0,2—0,3 мм [147]. В этом случае основную часть гирь помещают (через отверстие, закрываемое притертой пробкой) в полость корпуса ареометра, а остальные гири в виде проволочек навешивают на загнутый крючок верхний конец иглы, при этом отпадает необходимость в тарелке.

Следует заметить, что, несмотря на определенные достоинства, ареометры постоянного объема еще не получили распространения.

Ареометры постоянной массы по своему назначению делятся на две группы (см. также ГОСТ 18481-73):

1) ареометры для измерения плотности жидкостей (называются также денсиметрами<sup>1</sup>), шкалы которых градуированы в единицах плотности;

2) ареометры для измерения концентрации растворов, шкалы которых градуированы в процентах по объему или массе<sup>2</sup>.

К денсиметрам относятся<sup>3</sup>:

денсиметры общего назначения, служащие для измерения плотности различных жидкостей легче и тяжелее воды (водные растворы кислот, солей, щелочей и др.);

нефтеденсиметры (для измерения плотности нефти и нефтепродуктов);

лактоденсиметры (для измерения плотности молока и сыворотки);

денсиметры для морской воды;

урометры (для измерения плотности мочи);

аккумуляторные денсиметры (для измерения плотности раствора электролита в кислотных и щелочных аккумуляторах);

денсиметры АК (для жидкостей типа кислот).

К ареометрам для измерения концентрации растворов относятся:

спиртомеры — для измерения концентрации водно-спиртовых растворов, определяемой процентным (по объему) содержанием безводного спирта в растворе;

сахаромеры — для определения процентного (по массе) содержания сухих веществ в сахарных растворах;

клеомеры — для определения концентрации клеевых растворов, выраженной процентным (по массе) содержанием костного клея в воде;

гидрометры — для определения процентного (по объему) содержания этиленгликоля в его водном растворе.

Ареометры постоянной массы бывают стеклянные и металлические. В большинстве случаев применяют стеклянные ареометры, так как они обеспечивают более высокую точность измерений (стекло обладает наилучшей

<sup>1</sup> От латинского слова *densus* (*densi*) — плотный и греческого *metreo* — измеряю.

<sup>2</sup> Ареометры с условными шкалами, градуированными в градусах Боме, Бриллинга, Брикса, Траллеса и др., к применению в СССР не допускаются.

<sup>3</sup> Известны также денсиметры для сжиженных газов плотностью от 500 до 600 кг/м<sup>3</sup> [267].

смачиваемостью жидкостями), однако в ряде случаев, например при высокой температуре, они не могут быть использованы и незаменимыми оказываются металлические ареометры. Так, для измерения плотности расплавленных металлов применяют ареометры, изготовленные из термоустойчивых материалов — из стали с эмалевым покрытием, вольфрамового сплава, графита и др.

Спиртомеры также могут быть металлическими (подробнее см. § 1-4).

По метрологическому назначению (т. е. по назначению в схеме передачи размера единицы плотности) ареометры постоянной массы делятся на эталонные, образцовые и рабочие. Их характеристики и соподчинение определяются поверочной схемой.

Исходным (верхним) звеном поверочной схемы (ГОСТ 8.024-75) является государственный первичный эталон единицы плотности жидкости — килограмм на кубический метр ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), позволяющий воспроизводить

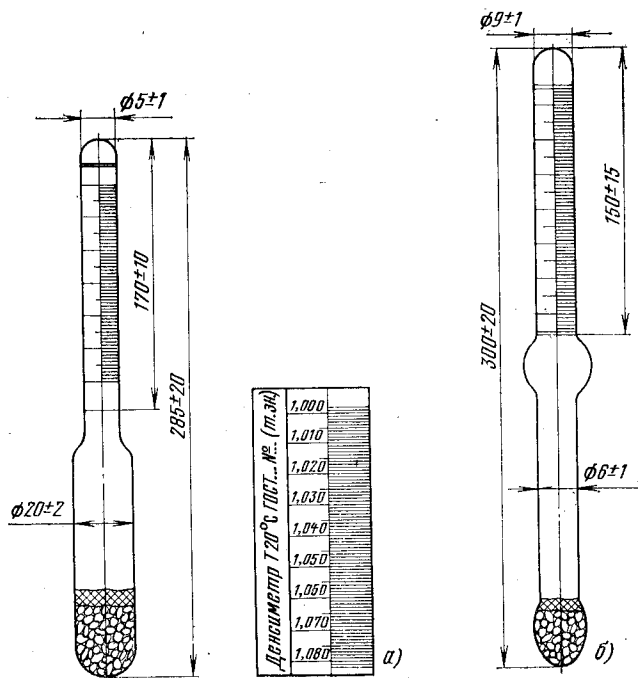


Рис. 1-4. Денсиметры общего назначения типов IIIa и IIIб.

значения плотности в диапазоне  $650\text{--}2000 \text{ кг}/\text{м}^3$  с погрешностью  $\pm 3,6 \cdot 10^{-4}\%$  при доверительной вероятности 0,997. Эталон представляет собой комплекс следующих средств измерений: набора (5 шт.) стеклянных шаровидных пикнометров с капиллярным отверстием (см. § 4-2) вместимостью 250 и 500  $\text{см}^3$ ; набора (6 шт.) стеклянных цилиндрических поплавков объемом 200 и 300  $\text{см}^3$ ; установки для гидростатического взвешивания (см. § 3-2); установок для заполнения под вакуумом и аттестации пикнометров; аппаратуры для измерения плотности воздуха [39].

Первичный эталон применяют для передачи размера единицы плотности рабочим эталонам путем непосредственного сличения при помощи поверочных жидкостей (см. § 1-5), а рабочие эталоны — для передачи размера единицы плотности образцовым ареометрам 1-го разряда; последние служат для градуировки и поверки образцовых 2-го разряда и высокоточных рабочих ареометров, а образцовые 2-го разряда — для градуировки и поверки рабочих ареометров. В некоторых случаях образцовые ареометры используют в качестве рабочих [78].

Стеклянный ареометр постоянной массы конструктивно выполняется в виде симметричного относительно продольной оси удлиненного тела, состоящего из полого корпуса цилиндрической (рис. 1-4,а) или веретенообразной (рис. 1-4,б) формы, верхняя часть которого заканчивается стержнем<sup>1</sup>. Стержень представляет собой тонкостенную цилиндрическую трубку круглого сечения с запаянным верхним концом.

Нижняя часть ареометра заполнена балластом, который неподвижно закреплен при помощи связующего вещества (смолки, сургуча), размягчающегося при температуре не ниже  $80^\circ\text{C}$ . Балласт предназначен для понижения центра тяжести ареометра, чтобы последний при погружении в жидкость плавал в строго вертикальном положении и находился при этом в устойчивом равновесии. В качестве балласта служат мелкая дробь, металлическая дробь или ртуть, которые должны быть сухими и чистыми. Существуют также ареометры с обособленной балластной камерой, которая соединена с нижней частью корпуса (рис. 1-5, 1-6).

<sup>1</sup> Здесь и далее речь идет только о стеклянных ареометрах, однако приводимые сведения по принципиальным вопросам в полной мере справедливы и для ареометров из других материалов.



К внутренней поверхности стержня ареометра прочно приклеена прозрачным клеем плотная бумажная полоска белого цвета, на которой нанесена шкала, соответствующая назначению ареометра.

Некоторые виды рабочих ареометров (нефтеденсиметры, лактоденсиметры, сахарометры, клеемеры, спиртомеры, гидрометры) изготавливают со встроенным термометром (рис. 1-7), позволяющим одновременно с плотностью измерять и температуру жидкости. Такие ареометры иногда называют термоареометрами. Жидкость,

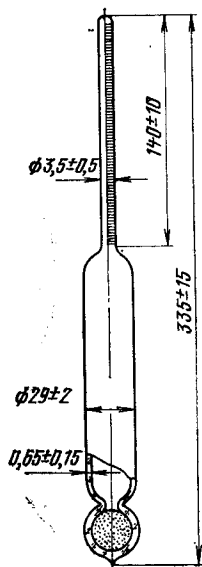


Рис. 1-5.

Рис. 1-5. Денсиметр для морской воды.

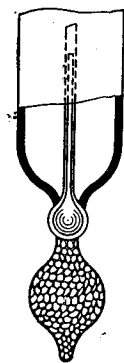


Рис. 1-6.

Рис. 1-6. Схема расположения резервуара термометра над балластом ареометра.

Рис. 1-7. Нефтеденсиметр типа А.

заполняющая резервуар термометра (ртуть, толуол), служит также частью балласта ареометра. Резервуар термометра может располагаться как под основным балластом ареометра (рис. 1-7), так и над ним (рис. 1-6).

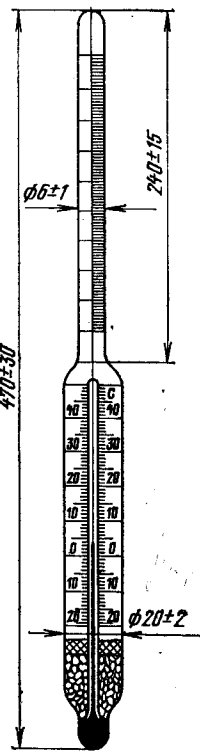


Рис. 1-7.

Бумажная полоска с нанесенной на ней термометрической шкалой помещается либо внутри корпуса ареометра (у нефтеденсиметров, спиртомеров, сахарометров и гидрометров), либо в верхней (расширенной) части стержня (у лактоденсиметров и клеемеров, так как они предназначены для непрозрачных жидкостей).

Основные требования к отдельным элементам рабочих ареометров и их метрологические характеристики сводятся к следующему.

Цена деления шкалы устанавливается числовыми значениями следующего ряда: у денсиметров 0,1; 0,2; 0,5; 2; 5; 10 и 20 кг/м<sup>3</sup>; у ареометров для измерения концентрации 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1%.

Ширина отметок шкалы не превышает 0,2 мм (0,1 мм у образцовых ареометров и у спиртомеров с ценой деления шкалы 0,1%). Длина числовых отметок равна не менее 0,25 длины окружности в поперечном сечении стержня, длина наименьших отметок — не менее 0,12 длины окружности (для образцовых ареометров соответственно 0,5 и 0,25 длины окружности).

Расстояние между соседними отметками, как правило, не менее 0,8 мм, у денсиметров для определения плотности малых количеств жидкости — не менее 0,5 мм.

Кроме крайних числовых отметок шкалы, которые соответствуют нижнему и верхнему пределам измерений данного ареометра, на каждом конце шкалы предусмотрено не менее двух дополнительных отметок (см. рис. 1-4,а) на расстоянии, соответствующем цене деления. Дополнительными отметками можно пользоваться в том случае, когда показание ареометра несколько выходит за пределы крайних числовых отметок.

На шкальной бумажной полоске или на отдельной полоске, помещенной внутрь корпуса ареометра, имеются следующие надписи и обозначения: наименование (назначение) ареометра; номер стандарта, которому соответствует ареометр; температура, для которой градуирована ареометрическая шкала; товарный знак или марка завода-изготовителя; заводской номер ареометра; надпись «Отсчет по верхнему краю мениска» (у нефтеденсиметров, рабочих лактоденсиметров и клеемеров, сахарометров и гидрометров).

Цена деления шкалы термометра, встроенного в ареометр, равна 0,2; 0,5 или 1°С (исключение составляют гидрометры, у которых цена деления термометрической шкалы равна 2°С). Погрешность показаний термометра не превышает 0,5 цены деления шкалы.

Погрешность показаний рабочих ареометров не превышает цены деления шкалы. В виде исключения у спиртомеров с ценой деления шкалы 1% и у гидрометров погрешность показаний не превышает 0,5 цены деления, т. е. соответственно  $\pm 0,5$  и  $\pm 1\%$ .

Денсиметры общего назначения (ГОСТ 1300-57) имеют основные технические характеристики, указанные в табл. 1-1. С 1-го января 1976 г. на эти приборы (под названием «ареометры общего назначения») введен ГОСТ 1300-74, в котором предусмотрена градуировка шкал в кг/м<sup>3</sup>, причем число типов приборов сокращено

до четырех: А1 с пределами измерений от 700—760 до 1780—1840 кг/м<sup>3</sup> (цена деления 1 кг/м<sup>3</sup>); А2 с пределами от 1000 до 2000 кг/м<sup>3</sup> (цена деления 1 кг/м<sup>3</sup>); А3 с пределами 1000—1400 и 1300—1800 кг/м<sup>3</sup> (цена деления соответственно 10 и 20 кг/м<sup>3</sup>); А с пределами 700—1000, 1000—1500 и 1000—1800 кг/м<sup>3</sup> (цена деления соответственно 5, 10 и 20 кг/м<sup>3</sup>).

Таблица 1-1

**Денсиметры общего назначения**

Тип	Назначение	Пределы измерений, г/см <sup>3</sup>	Цена деления шкалы, г/см <sup>3</sup>	Длина, мм	Число приборов в наборе
I	Для определения плотности малых количеств жидкости легче и тяжелее воды	От 0,700—0,760 до 1,780—1,840	0,001	150±20	19
IIa	Для определения плотности жидкости тяжелее воды	От 1,000—1,080 до 1,750—1,840	0,001	285±20	10
IIб	То же	От 1,840—1,920 до 1,920—2,000	0,001	340±20	2
IIIa	Для определения плотности жидкости легче воды	0,700—1,000	0,005	300±20	1
IIIб	Для определения плотности жидкости тяжелее воды	1,00—1,50	0,01	300±20	1
IIIв	То же	1,00—1,80	0,02	300±20	1
IVa	" "	1,00—1,40	0,01	280±20	1
IVб	" "	1,30—1,80	0,02	280±20	1

Нефтеденсиметры по ГОСТ 1289-57 бывают двух типов (оба со встроенным термометром): типа А (длина 470 мм±30 мм) с ценой деления шкалы 0,0005 кг/м<sup>3</sup>, пределами измерений плотности от 0,6500—0,7100 до 1,0100—1,0700 г/см<sup>3</sup> (набор из 7 приборов) и температуры от -20 до +45°С (рис. 1-7); типа Б (длина 280 мм±20 мм) с ценой деления шкалы 0,001 г/см<sup>3</sup>, пределами измерений плотности от 0,670—0,750 до 0,990—1,070 г/см<sup>3</sup> (набор из 5 приборов) и температуры от -20 до +35°С.

В соответствии с ГОСТ 1289-76 выпускаются ареометры для нефти типов АНТ1, АНТ2 со встроенным термометром и типа АН без термометра, градуируемые в кг/м<sup>3</sup>. Основные параметры и размеры ареометров АНТ1 и

АНТ2 те же, что и нефтеденсиметров соответственно типов А и Б. У ареометров АН (длина 300 мм) пределы измерений от 650—680 до 1040—1070 кг/м<sup>3</sup> (набор из 14 приборов), цена деления шкалы 0,5 кг/м<sup>3</sup>.

Лактоденсиметры типа А (с термометром) в соответствии с ГОСТ 8668-58 имеют пределы измерений 1,015—1,040 г/см<sup>3</sup> и цену деления шкалы 0,001 г/см<sup>3</sup>. Верхняя часть стержня выполнена расширенной, и в ней помещена бумажная полоска с термометрической шкалой. Пределы измерений по термометрической шкале 0—35°С. Длина прибора (270±30) мм. Изготавливают также лактоденсиметры типа Б (без термометра) с ценой деления шкалы 0,0005 г/см<sup>3</sup> и пределами измерений 1,0200—1,0400 г/см<sup>3</sup>. Длина прибора (330±20) мм\*.

Согласно ГОСТ 8668-75 лактоденсиметры называются ареометрами для молока (типа АМТ—с термометром, АМ—без термометра) и градуируются в кг/м<sup>3</sup>.

Денсиметры для морской воды (рис. 1-5) выпускают поштучно или наборами (см. ГОСТ 4226-73). Цена деления шкалы (в единицах относительной плотности) 0,0001. В большой набор входят 7 денсиметров со следующими пределами измерений: а) 1,0000—1,0060; б) 1,0050—1,0110; в) 1,0100—1,0160; г) 1,0150—1,0210; д) 1,0200—1,0260; е) 1,0250—1,0310; ж) 1,0300—1,0360.

Малый набор состоит из трех («а», «б», «в» или «г», «д», «е») или двух («в», «г») денсиметров. К каждому из указанных наборов прилагаются: денсиметр-искатель (длина 270—20 мм) с пределами измерений 1,000—1,040 и ценой деления шкалы 0,001; термометр (ГОСТ 2045-71) с пределами измерений от -5 до +45°С и ценой деления 0,5°С (допускаемая погрешность—не более ±0,5°С); стеклянный цилиндр (ГОСТ 9545-73) диаметром 70 мм и высотой 335 мм.

Урометры (ГОСТ 1032-60) имеют цену деления шкалы 0,001 г/см<sup>3</sup> и комплектуются в наборы из двух штук с пределами измерений соответственно 1,000—1,025 и 1,025—1,050 г/см<sup>3</sup> (согласно ГОСТ 1032-75 введена градуировка в кг/м<sup>3</sup>). Длина урометра (150±10) мм. К при-

\* Для повышения точности измерений предложен лактоденсиметр, на стержне которого нанесена лишь одна метка. Отсчет плотности производится по шкале, нанесенной на трубчатом отростке пробки, закрывающей сосуд с молоком после погружения прибора. Верхняя часть стержня и отросток не соприкасаются с жидкостью, что исключает влияние мениска на точность отсчета.

бору прилагается цилиндр внутренним диаметром ( $21 \pm 1$ ) мм и длиной ( $170 \pm 5$ ) мм.

Аккумуляторные денсиметры (ГОСТ 895-66) выпускают двух типов: типа А [длина ( $110 \pm 0,5$ ) мм] с ценой деления шкалы  $0,01 \text{ г/см}^3$  и пределами измерений  $1,10-1,30$  и  $1,20-1,40 \text{ г/см}^3$ ; типа Б [длина ( $120 \pm 5$ ) мм] с ценой деления шкалы  $0,005 \text{ г/см}^3$  и пределами измерений  $1,050-1,170$ ;  $1,160-1,280$  и  $1,280-1,400 \text{ г/см}^3$ .

Денсиметр комплектуется со специальной стеклянной пипеткой, в которую его помещают при измерениях. На пипетку сверху надета резиновая груша, а снизу вставлена резиновая пробка с эбонитовым наконечником. При помощи груши электролит засасывают в пипетку за один прием в количестве, необходимом для измерения плотности. На корпусе денсиметра имеются шипы, препятствующие его прилипанию к стенкам пипетки.

Денсиметры АК (ГОСТ 5.1304-72) выпускают (поштучно и наборами) двух назначений: рабочий денсиметр (длина  $265_{-10}$  мм) с ценой деления шкалы  $0,0002 \text{ г/см}^3$  и пределами измерений  $1,5600-1,5800$ ;  $1,5800-1,6000$  и  $1,6000-1,6200 \text{ г/см}^3$ ; искатель (длина

Таблица 1-2

**Спиртомеры**

Тип	Длина, мм	Цена деления шкалы	Пределы измерений	Число приборов в наборе	Примечание
		% по объему при 20°C			
А	$330 \pm 20$	0,1	От 0—10 до 90—100 и 95—105	11	У спиртомера с пределами измерений 95—105 шкала на участке 100—105 условная и служит для определения концентрации при температуре выше 20°C
Б	$240 \pm 20$	0,1	От 16—21 до 66—71	11	—
В	$200 \pm 20$	0,2	От 0—5 до 15—20	4	—
Г	$200 \pm 20$	1	0—40 40—70 70—100	3	—
Д	$360 \pm 20$	1	0—60 60—100	2	Пределы измерений встроенного термометра—от -25 до +35°C

$280^{+10}$  мм) с ценой деления шкалы  $0,001 \text{ г/см}^3$  и пределами измерений  $1,530-1,630 \text{ г/см}^3$ .

В набор входят также термометр (ГОСТ 215-73) с пределами измерений  $0-50^\circ\text{C}$ , ценой деления шкалы  $0,1^\circ\text{C}$ , допускаемой погрешностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  и цилиндр (диаметр 53—56 мм, высота 340 мм) с шлифованной пробкой.

Спиртомеры согласно ГОСТ 3637-59 изготавливались наборами пяти типов, характеристики которых приведены в табл. 1-2. В соответствии с ГОСТ 3637-75 «Ареометры для спирта» отменяются приборы типа В (табл. 1-2), а для приборов типа А с пределами измерений  $0-10\%$  по объему допускаемая погрешность увеличивается до  $\pm 0,2\%$  (удвоенная цена деления шкалы).

Сахарометры (ГОСТ 8667-74) выпускают наборами; их характеристики даны в табл. 1-3.

Таблица 1-3

**Сахарометры**

Тип	Длина, мм	Цена деления шкалы	Пределы измерений	Число приборов в наборе, шт.	Примечание
		% по массе			
СЗ	$280 \pm 20$	0,5	0—25 25—50 50—75	3	—
СЗ	$150 \pm 15$	0,5	0—10 10—20	2	Для малых количеств жидкости
С2	$200 \pm 20$	0,2	0—10 10—20	2	То же
С1	$200 \pm 20$	0,1	От 0—5 до 20—25	5	" "
СТ2	$370 \pm 30$	0,1	От 0—10 до 60—70	9	Пределы измерений встроенного термометра—от 0 до 40°C
СТ1	$430 \pm 20$	0,05	0—8 8—16 16—24	3	То же

Клеометры имеют пределы измерений  $0-50\%$  по массе и цену деления шкалы  $1\%$ . В клеомер встроен термометр, причём бумажная полоска с термометрической шкалой помещена в верхней (расширенной) части стержня. Пределы измерений температуры  $0-80^\circ\text{C}$ .

Термометрическая шкала представлена в виде поправки на температуру к показаниям клеомера, выражен-

ных в процентах по массе. Шкала поправок имеет пределы от  $-7,5$  до  $+2\%$  и цену деления  $0,5\%$ . Погрешность показаний по шкале поправок не превышает  $0,5$  цены деления.

Гидрометры имеют пределы измерений  $20-100\%$  по объему при  $20^\circ\text{C}$  и цену деления шкалы  $2\%$ . На шкале гидрометра нанесены также значения температуры замерзания охлаждающей жидкости, соответствующие определенным концентрациям этиленгликоля. В корпус гидрометра встроен термометр с пределами измерений от  $-20$  до  $+40^\circ\text{C}$  и ценой деления шкалы  $2^\circ\text{C}$ .

## 1-2. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ АРЕОМЕТРОВ

При конструировании ареометра необходимо придать ему такую форму и такие размеры, чтобы обеспечивалось его устойчивое равновесие при плавании в жидкости. Для этого должны соблюдаться следующие условия:

1) центр тяжести ареометра и точка приложения выталкивающей силы, совпадающая с центром тяжести объема жидкости, вытесненной ареометром, должны лежать на одной вертикальной прямой;

2) центр тяжести ареометра должен находиться ниже точки приложения выталкивающей силы.

Выполнение первого условия достигается приданием ареометру формы, симметричной относительно вертикальной оси. Для соблюдения второго условия нижняя часть корпуса ареометра заполняется балластом.

Массу балласта определяют, исходя из общей потребной массы ареометра в соответствии с уравнением (1-4). Если в этом уравнении отбросить, как сравнительно малый, член  $La(\rho-D)$ , учитывающий влияние мениска, а также пренебречь влиянием плотности воздуха, то для случая погружения ареометра до нижней отметки шкалы ( $l=0$ ) получим  $M \approx v\rho$ , т. е. масса ареометра приближенно равна произведению объема его корпуса до нижней отметки шкалы на плотность жидкости, соответствующую этой отметке. Окончательно массу балласта подгоняют опытным путем.

У ареометра со шкалой, охватывающей большой интервал плотностей, если его корпус выполнить цилиндрическим (см. рис. 1-4,а), центр тяжести будет расположен близко к центру тяжести вытесненной жидкости, т. е. равновесие ареометра будет неустойчивым. Так как

в этом случае невозможно опустить центр тяжести ареометра еще ниже, приходится поднять центр тяжести вытесненной жидкости, для чего корпусу придают веретенообразную форму (см. рис. 1-4,б).

Для расчета размеров ареометра воспользуемся упрощенным уравнением равновесия ареометра, которое получается из уравнения (1-4), если отбросить член, учитывающий влияние мениска, и величину  $D$  в правой части:

$$M = (v + lS)\rho. \quad (1-5)$$

тогда

$$l = \frac{M}{S\rho} - \frac{v}{S},$$

т. е. глубина погружения ареометра находится в гиперболической зависимости от плотности жидкости (см. также § 1-1). Отсюда чувствительность ареометра

$$\frac{\partial l}{\partial \rho} = -\frac{M}{S\rho^2}.$$

Как видим, чувствительность прямо пропорциональна массе ареометра и обратно пропорциональна квадрату диаметра стержня.

Введем некоторые дополнительные обозначения:  $l_0$  — длина шкалы ареометра;  $\rho_1$  — плотность, соответствующая нижней отметке шкалы;  $\rho_2$  — плотность, соответствующая верхней отметке шкалы. Тогда погружению ареометра до нижней отметки шкалы ( $l=0$ ) соответствует уравнение

$$M = v\rho_1,$$

а погружению до верхней отметки ( $l=l_0$ ) — уравнение

$$M = \left( v + \frac{\pi d^2 l_0}{4} \right) \rho_2,$$

где вместо  $S$  подставлено  $\frac{\pi d^2}{4}$ .

Приравнивая правые части этих уравнений, получаем новое уравнение, решение которого приводит к следующим трем формулам, характеризующим соотношение между объемом корпуса, диаметром стержня и длиной шкалы:

$$d = 2 \sqrt{\frac{v(\rho_1 - \rho_2)}{\pi l_0 \rho_2}}; \quad (1-6)$$

$$l_0 = \frac{4v(\rho_1 - \rho_2)}{\pi d^2 \rho_2}; \quad (1-7)$$

$$v = \frac{\pi d^2 l_0 \rho_2}{4(\rho_1 - \rho_2)}. \quad (1-8)$$

Пользуясь формулами (1-6)–(1-8), по двум из трех основных характеристик ( $d$ ,  $l_0$ ,  $v$ ) ареометра легко определяют неизвестную третью для заданных пределов измерений  $\rho_1$  и  $\rho_2$ .

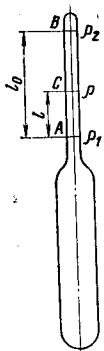


Рис. 1-8. Схема шкалы ареометра.

Рассмотрим вопрос о расчете и построении шкалы ареометра. Пусть требуется построить шкалу ареометра, у которой нижняя отметка  $A$  соответствует плотности  $\rho_1$ , а верхняя  $B$  —  $\rho_2$  (рис. 1-8); длина шкалы равна  $l_0$ . Задача сводится к определению положения на шкале промежуточной отметки  $C$ , соответствующей некоторой плотности между  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Обозначив расстояние до этой отметки от нижней отметки через  $l$ , составим уравнения равновесия ареометра при последовательном погружении его в жидкости плотностью  $\rho_1$ ,  $\rho$  и  $\rho_2$ . Пренебрегая в уравнении (1-4) влиянием  $LaD$ , т. е. выталкивающей силы, действующей на мениск (она ничтожна по сравнению с весом ареометра), для указанных трех случаев получаем уравнения

$$M + La\rho_1 = v(\rho_1 - D);$$

$$M + La\rho = (v + lS)(\rho - D);$$

$$M + La\rho_2 = (v + l_0S)(\rho_2 - D).$$

Перенеся вправо второй член левой части каждого уравнения и приравняв затем правую часть первого уравнения поочередно правым частям второго и третьего уравнений, получим:

$$v(\rho_1 - D) - La\rho_1 = (v + lS)(\rho - D) - La\rho$$

и

$$v(\rho_1 - D) - La\rho_1 = (v + l_0S)(\rho_2 - D) - La\rho_2.$$

После упрощений найдем:

$$(v - La)(\rho_1 - \rho) = lS(\rho_1 - D);$$

$$(v - La)(\rho_1 - \rho_2) = l_0S(\rho_2 - D).$$

Почленное деление первого уравнения на второе дает:

$$l = l_0 \frac{\rho_2 - D}{\rho_1 - \rho_2} \frac{\rho_1 - \rho}{\rho - D}. \quad (1-9)$$

Так как для каждого данного ареометра множитель

$$l_0 \frac{\rho_2 - D}{\rho_1 - \rho_2} = k_0, \quad (1-10)$$

в который входят заданные величины, является постоянным, его можно вычислить предварительно, тогда формула для расчета шкалы примет вид:

$$l = k_0 \frac{\rho_1 - \rho}{\rho - D}. \quad (1-11)$$

Задаваясь последовательно значениями плотности  $\rho$ , по формуле (1-11) подсчитывают расстояние  $l$  от нижней отметки шкалы до соответствующих отметок и по этим данным наносят шкалу (положение крайних отметок определяют опытным путем).

Формула (1-9) показывает, что построение шкалы производится вне зависимости от таких величин, как масса ареометра, объем его корпуса и диаметр стержня. Следовательно, шкалы всех однотипных ареометров, имеющих одни и те же пределы измерений и одинаковую цену деления, рассчитывают одинаково.

Более того, из формулы (1-9) вытекает, что расстояние отметок шкалы от нижней отметки пропорциональны длине шкалы, т. е. шкалы однотипных ареометров при разной длине подобны друг другу. Поэтому достаточно выполнить расчет значений  $l$  в виде таблицы для какой-либо определенной длины шкалы, а для всех других однотипных ареометров с иными длинами шкал различные значения изменить пропорционально длинам шкал.

Значительное влияние мениска на глубину погружения ареометра в жидкость заставляет учитывать это обстоятельство при конструировании ареометра. Так как разные жидкости имеют различную капиллярную постоянную, то шкала ареометра, предназначенного для одной жидкости, не может быть тождественна шкале ареометра для другой жидкости. Этим и объясняется большое разнообразие типов ареометров, рассмотренных ранее.

Естественно, что ареометр показывает правильно лишь в той жидкости, для которой градуирована его шкала. Однако ареометром, предназначенным для одной жидкости, можно также измерять плотность других жидкостей, если соответствующим образом учитывать влияние капиллярных свойств жидкостей. Поправку,

которую следует при этом ввести в показание ареометра, называют поправкой на капиллярность. Выведем формулу для расчета этой поправки.

Пусть ареометр, градуированный для жидкости, капиллярная постоянная которой равна  $a_1$ , при погружении сначала в эту жидкость, а затем в другую жидкость с капиллярной постоянной  $a_2$  показал одинаковую плотность  $\rho_1$ . Очевидно, что действительная плотность второй жидкости не равна  $\rho_1$ , так как влияние мениска у рассматриваемых жидкостей различно. Для определения действительной плотности второй жидкости составим уравнения равновесия ареометра в обеих жидкостях (температура предполагается равной нормальной для данного ареометра):

$$M + La_1(\rho_1 - D) = (v + lS)(\rho_1 - D)$$

и

$$M + La_2(\rho_2 - D) = (v + lS)(\rho_2 - D).$$

В обоих уравнениях  $l$  — одно и то же, так как глубина погружения ареометра в обеих жидкостях одинакова по условию. Разделив почленно первое уравнение на второе, после преобразований найдем:

$$\rho_2 - \rho_1 = \frac{(a_2 - a_1)L[\rho_1\rho_2 - D(\rho_1 + \rho_2) + D^2]}{M}.$$

Ввиду малости членов  $D(\rho_1 + \rho_2)$  и  $D^2$  в сравнении с  $\rho_1\rho_2$  ими можно пренебречь. Произведение  $\rho_1\rho_2$ , учитывая близость значений  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , заменяем  $\rho_1^2$ . Так как  $L = \pi D$ , то

$$\rho_2 = \rho_1 + \frac{(a_2 - a_1)\pi d \rho_1^2}{M}.$$

Второе слагаемое в общем виде выражается как

$$\Delta_k = \frac{(a_2 - a_1)\pi d \rho^2}{1000M}, \quad (1-12)$$

где  $\Delta_k$  — поправка на капиллярность, г/см<sup>3</sup>;  $\rho$  — показание ареометра, г/см<sup>3</sup>;  $d$  — диаметр стержня ареометра у отметки, соответствующей показанию  $\rho$ , мм;  $M$  — масса ареометра в воздухе, г.

При этом значения  $\rho$ ,  $d$  и  $M$  достаточно определить приближенно, а именно:  $\rho$  — с двумя десятичными знаками,  $d$  и  $M$  — с одним десятичным знаком.

Как видно из уравнения равновесия ареометра (1-4), показания прибора правильны только при той темпера-

туре, при которой производилась градуировка шкалы, так как входящий в уравнение объем погруженной части ареометра зависит от температуры жидкости. Температуру, при которой наносится шкала ареометра, принято называть нормальной температурой данного ареометра; ее указывают на шкале (см. § 1-1).

Для ареометров установлена нормальная температура 20°C (ГОСТ 9249-59). Как уже указывалось, исключения составляют ареометры для морской воды и клемеры; их нормальная температура равна соответственно 17,5 и 75°C.

Температура жидкости при измерении плотности обычно отличается от нормальной температуры ареометра, в связи с чем в его показания необходимо вводить поправку, учитывающую изменение объема ареометра. Если температура жидкости больше нормальной температуры ареометра, то вследствие расширения стекла объем ареометра увеличится по сравнению с тем объемом, который он занимал в градуировочной жидкости той же плотности, увеличится также выталкивающая сила, т. е. глубина погружения ареометра будет меньше, следовательно, его показание окажется больше действительной плотности, и необходимая поправка будет иметь знак минус.

Если температура жидкости меньше нормальной температуры ареометра, объем его уменьшится, а глубина погружения увеличится, т. е. поправка к показанию ареометра будет иметь знак плюс.

Для определения поправки допустим, что ареометр с нормальной температурой  $t_0$  последовательно погружен в одну и ту же жидкость при температурах  $t_0$  и  $t$ , причем в обоих случаях показания прибора получились одинаковыми и равными  $\rho$ . Очевидно, что при первом погружении показание было правильным (действительная плотность жидкости равна  $\rho$ ), а при втором — неправильным. Обозначим действительную плотность второй жидкости через  $\rho_t$ .

В первой жидкости объем погруженной части ареометра остается таким же, как при градуировке шкалы, а именно:  $v + lS$ , в то время как во второй жидкости он изменяется и становится равным  $(v + lS)[1 + \beta(t - t_0)]$ , где  $\beta$  — коэффициент объемного теплового расширения стекла.

Тогда уравнения равновесия ареометра для обоих случаев будут иметь вид:

$$M + La(\rho - D) = (v + lS)(\rho - D);$$

$$M + La(\rho_t - D) = (v + lS)[1 + \beta(t - t_0)](\rho_t - D).$$

Пренебрегая ничтожным влиянием изменения массы мениска, можно считать практически равными левые части уравнений, откуда получаем:

$$\rho_t - \rho = -\beta(t - t_0)\rho_t + \beta(t - t_0)D.$$

Отбрасывая второй член правой части равенства, как весьма малый, находим:

$$\rho_t = \frac{\rho}{1 + \beta(t - t_0)},$$

или приближенно

$$\rho_t = \rho[1 - \beta(t - t_0)].$$

Окончательно имеем:

$$\rho_t = \rho + \beta(t_0 - t)\rho.$$

Таким образом, при измерении плотности жидкости, температура  $t$  которой отличается от нормальной температуры ареометра  $t_0$ , в показание  $\rho$  прибора следует ввести поправку

$$\Delta'_t = \beta(t_0 - t)\rho. \quad (1-13)$$

Для стекла можно принять в среднем  $\beta = 25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (см. табл. В-2).

При сравнении показаний двух ареометров с одинаковой нормальной температурой, погруженных в одну и ту же жидкость, температура которой отличается от нормальной, поправку на изменение объема ареометра нет необходимости учитывать, так как она одинакова для обоих приборов. В этом случае температура жидкости не имеет значения.

Если же нормальная температура двух сличаемых ареометров различна, то поправка на температуру становится индивидуальной для каждого ареометра и ее приходится учитывать. Пусть нормальная температура одного ареометра равна  $t_1$ , другого  $t_2$ , температура жидкости  $t$ , показание первого ареометра в этой жидкости  $\rho_1$ , а второго  $\rho_2$ , тогда [62]

$$\rho_1 = \rho_2 + \beta(t_2 - t_1)\rho_1, \quad (1-14)$$

причем величина

$$\Delta_t = \beta(t_2 - t_1)\rho_1 \quad (1-15)$$

является поправкой на температуру, вводимой к показанию второго ареометра при сличении его с первым. Как видим, температура жидкости и в этом случае не оказывает влияния; имеет значение лишь различие в нормальных температурах ареометров.

Формула (1-14) позволяет определить, каково было бы показание второго ареометра, если бы он был градуирован для той же температуры, что и первый.

### 1-3. ПОЛЬЗОВАНИЕ АРЕОМЕТРАМИ

Перед определением плотности (концентрации) жидкости выбирают тип ареометра и его пределы измерений, руководствуясь при этом данными, указанными в паспорте на испытуемую жидкость, а также требуемой точностью измерения.

Испытуемую жидкость наливают в стеклянный цилиндр (ГОСТ 9545-73), внутренний диаметр которого превышает диаметр корпуса ареометра не менее чем вдвое, а высота несколько превышает длину ареометра. Если жидкость непрозрачна, можно применять металлический цилиндр, при этом после погружения ареометра в жидкость ее уровень должен находиться у верхнего края цилиндра.

Цилиндр перед заполнением жидкостью промывают теплой водой, насухо вытирают чистым полотенцем и споласкивают испытуемой жидкостью.

Для того чтобы жидкость не вспенивалась при заполнении цилиндра, струю жидкости направляют на стенки цилиндра, а не на дно, причем наливают жидкость по стеклянной палочке. Если пена все же образовалась, ее необходимо удалить фильтровальной бумагой. Для удаления пены маловязкой жидкости часто оказывается достаточным хлопнуть ладонью по верху цилиндра.

Непосредственно перед погружением ареометра жидкость в цилиндре тщательно перемешивают стеклянной или металлической мешалкой, длина которой превышает высоту цилиндра. Стеклянная мешалка изготавливается из стеклянного прутка, конец которого загнут в плоскую спираль под прямым углом к прутку. Металлическая мешалка представляет собой круглую или серповидную пластинку, припаянную перпендикулярно стержню. Мешалку следует в 5—7 раз переместить вверх и вниз по всей высоте столба жидкости, не вынимая из жидкости, чтобы в нее не попадал воздух. Если в жидкости все же появились пузырьки воздуха, то к измерению можно приступить лишь после того, как они удалены.

Затем, взявшись двумя пальцами за верхний конец стержня, чистый сухой ареометр медленно и осторожно погружают (вертикально) в жидкость так, чтобы он не задевал стенок цилиндра. После того как ареометр погрузится в жидкость настолько, что отметка шкалы, соответствующая ожидаемой плотности (концентрации), окажется на 3—5 мм выше уровня жидкости, ареометр выпускают из пальцев и дают ему возможность свободно опуститься под действием собственного веса; это необходимо для образования правильного мениска. Если ареометр опустится преждевременно, то он начнет быстро погружаться в жидкость, может удариться о дно цилиндра и разбиться. Кроме того, вследствие глубокого погружения, вызванного движением ареометра по инерции, жидкость смочит

стержень намного выше отметки, соответствующей ее плотности (концентрации), и показание прибора будет неправильным. После полного успокоения ареометра отсчитывают его показание.

Так как в большинстве случаев температура исследуемой жидкости отличается от нормальной температуры ареометра, в показания прибора вводят поправку на температуру по формуле (1-13).

Показание спиртомера соответствует искомой концентрации спиртового раствора только при температуре 20°C. Во всех остальных случаях показание прибора при данной температуре раствора необходимо пересчитать на концентрацию в процентах при 20°C (ГОСТ 3639-61). Для этой цели служат спиртомерные таблицы [141], в которые включена табл. III для определения концентрации раствора в интервале показаний спиртомера 0—105 при температуре от —25 до 40°C, составленная по формуле (1-13).

#### 1-4. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПИРТОМЕРЫ

Металлические спиртомеры делятся на рабочие, образцовые 2-го разряда и образцовые 1-го разряда. Рабочие металлические спиртомеры служат для измерения концентрации водно-спиртовых растворов, образцовые металлические спиртомеры 2-го разряда — для поверки рабочих спиртомеров. Образцовые металлические спиртомеры 1-го разряда применяются при изготовлении образцовых 2-го разряда и рабочих спиртомеров.

Образцовый металлический спиртомер 2-го разряда и рабочий металлический спиртомер (ГОСТ 3638-53) по конструкции и размерам одинаковы и состоят из пустотелого позолоченного латунного шарика с припаянными к нему сверху и снизу позолоченными латунными стержнями (рис. 1-9,а). Верхний стержень выполнен в виде закрытой сверху четырехгранной трубки, нижний имеет форму расширяющегося книзу конуса, заканчивающегося грушевидным наконечником, который играет ту же роль, что и балласт у стеклянного ареометра. Поверхности спиртомера отполированы. На широкой стороне верхнего стержня нанесена равномерная условная шкала, разделенная на 100 частей. Первая снизу и каждая десятая отметка выполнены во всю ширину стержня и помечены возрастающими снизу вверх числами от 0 до 10. Расстояние между смежными промежуточными отметками соответствует 0,1 условной единицы. Под нижней (нулевой) отметкой шкалы выгравировано число 100 (рис. 1-9,б).

Шкала градуирована для температуры 20°C. У рабочих спиртомеров шкала предусмотрена на обеих широких сторонах стержня, у образцовых спиртомеров 2-го разряда — только на одной стороне.

На одной из узких сторон верхнего стержня на расстоянии 0,3 мм выше и ниже каждой крайней отметки шкалы нанесены контрольные отметки, которые используются при изготовлении спиртомера. На противоположной боковой стороне стержня выше шкалы обозначены заводской номер спиртомера и нормальная температура (20°C).

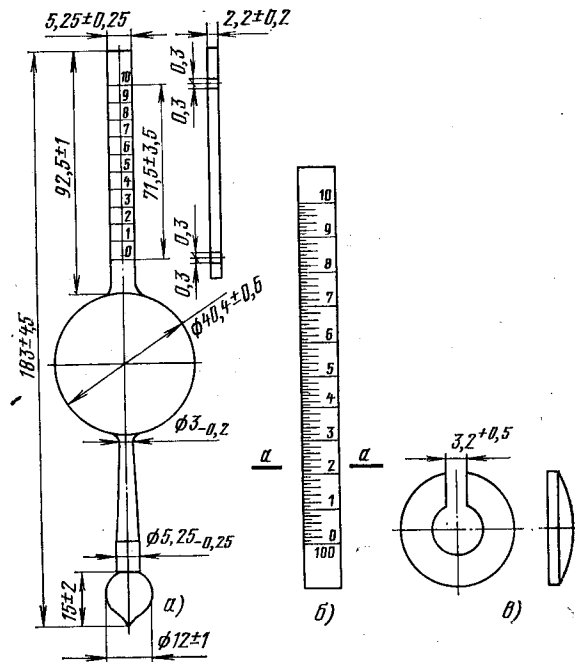


Рис. 1-9. Образцовый 2-го разряда и рабочий металлический спиртомер.

а — конструктивная схема; б — шкала; в — гирька.

К спиртомеру прилагается комплект из 8 полированных позолоченных латунных гирек разных размеров, имеющих форму шарового сегмента (рис. 1-9,в). В центре гирька имеет отверстие, диаметр которого несколько превышает наибольший диаметр конуса нижнего стержня спиртомера, и прорезь, ширина которой превышает наименьший диаметр конуса стержня. Гирьку надевают (выпуклой стороной вниз) на узкую часть конуса и опу-



скают вниз до упора в грушевидный наконечник. Снимают гирьку в обратной последовательности.

На плоской поверхности каждой гирьки обозначено одно из следующих условных чисел: 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 (чем крупнее и тяжелее гирька, тем меньше указанное на ней число). Гирька 90 имеет наружный диаметр 13 мм, гирька 20—18 мм.

Гирьки можно применять только с тем спиртомером, для которого они предназначены, поэтому на каждой гирьке нанесен заводской номер соответствующего спиртомера.

В зависимости от концентрации испытуемого раствора спиртомер применяют либо без гирьки, либо с одной из гирек. Чем больше концентрация, тем меньше плотность раствора, тем легче должен быть спиртомер (см. § 1-1) и, следовательно, тем меньшая по массе гирька должна быть применена для погружения спиртомера в раствор. Поэтому для очень крепких растворов следует пользоваться спиртомером без гирьки, а для слабых растворов — спиртомером с самой тяжелой гирькой (20).

Таким образом, металлический спиртомер с восемью гирьками представляет собой набор из девяти ареометров постоянной массы. Прибор рассчитан таким образом, чтобы можно было измерять концентрацию спиртовых растворов в пределах 20—110 условных единиц при температуре 0—40°C или 20—103,4 условных единиц при температуре от —25 до 0°C, что соответствует концентрации в диапазоне 25,7—100% по объему при 20°C.

Погрешность показаний (в условных единицах) не превышает: для рабочего спиртомера  $\pm 0,1$ , для образцового спиртомера 2-го разряда  $\pm 0,06$  \*.

Гирьку к спиртомеру подбирают следующим образом. Если возможные пределы концентрации неизвестны, то сначала погружают спиртомер без гирьки, а затем последовательно с каждой гирькой, начиная с наиболее легкой (90), до тех пор, пока уровень жидкости не будет пересекать стержень в какой-либо части шкалы.

Если же при погружении спиртомера без гирьки уровень жидкости окажется выше верхней отметки шкалы, то раствор следует охладить (перенести в более холодное помещение или поместить в сосуд со льдом). При

\* Соответствующая погрешность, выраженная в процентах объемной концентрации раствора, может быть подсчитана по спиртомерным таблицам.

охлаждении раствора отношение объемов спирта и воды уменьшается, так как коэффициент объемного расширения у спирта примерно в 5 раз больше, чем у воды (см. табл. В-3), следовательно, объемная концентрация спирта в растворе падает, т. е. показания спиртомера при неизменной исходной концентрации раствора (в процентах по объему при 20°C) уменьшается.

Когда известны возможные пределы концентрации раствора и температура в помещении составляет около 20°C, требуемая гирька может быть ориентировочно подобрана по данным табл. 1-4.

Таблица 1-4

Подбор гирек

Концентрация раствора, % по объему	Гирька	Концентрация раствора, % по объему	Гирька
33—45	20	Свыше 78 до 85	70
Свыше 45 до 55	30	Свыше 85 до 90	80
Свыше 55 до 64	40	Свыше 90 до 95	90
Свыше 64 до 71	50	Свыше 95 до 100	Без гирьки
Свыше 71 до 78	60		

Показание спиртомера отсчитывают по нижнему краю мениска, пользуясь шкалой на той стороне стержня, которая обращена к свету. Если уровень жидкости находится между двумя смежными отметками шкалы, отсчет выполняют по ближайшей отметке.

Показание спиртомера без гирьки подсчитывают как сумму двух чисел: числа 100, нанесенного под нижней отметкой шкалы, и числа, отсчитанного по шкале в месте пересечения ее линией уровня. Например, при погружении спиртомера без гирьки до уровня  $a-a$  (см. рис. 1-9,б) показание равно  $100+2,2=102,2$  условных единиц (отсчет проведен по ближайшей отметке).

При измерении спиртомером с подвешенной к нему гирькой следует к отсчету по шкале прибавить число, обозначенное на гирьке. Например, если спиртомер с гирькой 70 остановился в жидкости так, что линия мениска занимает то же положение  $a-a$  (рис. 1-9), то показание спиртомера составляет  $70+2,2=72,2$  условных единиц.

Как указывалось ранее, металлический спиртомер имеет условную шкалу. Концентрацию раствора при 20°C

определяют по показанию спиртомера, пользуясь спиртомерными таблицами [141], куда включена табл. IV для металлических спиртомеров. Она построена аналогично табл. III с тем лишь отличием, что значения температуры от 40 до  $-25^{\circ}\text{C}$  даны с интервалом  $0,5^{\circ}\text{C}$ , а показания спиртомера — в условных единицах с шагом 0,2.

Рассмотрим основы расчета шкалы металлического спиртомера.

Опущенный в спиртовой раствор плотностью  $\rho_0$  при определенной температуре спиртомер без гирьки должен погрузиться до крайней верхней отметки шкалы, помеченной числом 10. В другом растворе большей плотности  $\rho_1$  при той же температуре спиртомер без гирьки должен погрузиться до крайней нижней отметки шкалы, помеченной цифрой 0. Спиртомер с самой легкой гирькой 90 в растворе плотностью  $\rho_1$  должен погрузиться до верхней отметки, а в растворе большей плотности  $\rho_2$  — до нижней отметки. Нагруженный более тяжелой гирькой 80 спиртомер должен погрузиться до верхней отметки в растворе плотностью  $\rho_2$  и до нижней отметки в растворе большей плотности  $\rho_3$  и т. д. Наконец, с самой тяжелой (восьмой) гирькой 20 спиртомер должен погрузиться до верхней отметки в растворе плотностью  $\rho_7$  и до нижней отметки в растворе плотностью  $\rho_8$ .

Спиртовые растворы плотностью  $\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_8$  принято называть предельными спиртами, причем первый из них — раствор с наименьшей плотностью  $\rho_0$  — называется исходным предельным спиртом.

Плотность исходного предельного спирта устанавливают произвольно, но так, чтобы при нормальной температуре спиртомером можно было измерять спиртовые растворы наибольшей концентрации. Поэтому в качестве исходного предельного спирта принят спиртовой раствор концентрацией 99,04% по объему при  $20^{\circ}\text{C}$ , плотность которого при температуре  $20^{\circ}\text{C}$   $\rho_0 = 794,11 \text{ кг/м}^3$ .

Для расчета спиртомера вводят еще две дополнительные гирьки: 10 и 0. Десятая гирька 0 является наиболее тяжелой, и нагруженный ею спиртомер должен погрузиться до верхней отметки шкалы в десятом предельном спирте (плотностью  $\rho_0$ ) и до нижней отметки в дистиллированной воде.

<sup>1</sup>Здесь и далее при расчете спиртомера индексом при  $\rho$  обозначается номер раствора, а не температура, при которой измеряли плотность.

Примем следующие обозначения (объемы и плотности отнесены к нормальной температуре):  $v_0$  — объем нижней части спиртомера до нулевой отметки;  $v_c$  — объем стержня на участке между крайними отметками шкалы;  $m$  — масса спиртомера (вместе с заключенным в нем воздухом);  $m_1, m_2, \dots, m_{10}$  — массы 1-й, 2-й, ..., 10-й гирек, помеченных соответственно числами 90, 80, ..., 10 и 0;  $\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{10}$  — плотности предельных спиртов (соответственно исходного, 1-го, 2-го и т. д.);  $\rho_B$  — плотность дистиллированной воды;  $\rho$  — плотность латуни, из которой изготовлены гирьки, тогда уравнение равновесия спиртомера без гирьки в исходном предельном спирте (погружение до верхней отметки шкалы) можно записать (для упрощения множитель  $g$  опущен, поскольку он входит в обе части уравнения) в виде

$$m = (v_0 + v_c) \rho_0. \quad (1-16)$$

Тот же спиртомер в первом предельном спирте погрузится до нижней отметки шкалы, и уравнение равновесия будет иметь вид:

$$m = v_0 \rho_1. \quad (1-17)$$

В этом же спирте спиртомер с гирькой 90 опустится до верхней отметки, т. е.

$$m + m_1 = \left( v_0 + v_c + \frac{m_1}{\rho} \right) \rho_1,$$

где  $\frac{m_1}{\rho}$  — объем гирьки 90.

Уравнение равновесия спиртомера с гирькой 90 во втором предельном спирте (погружение до нижней отметки) запишется в виде

$$m + m_1 = \left( v_0 + \frac{m_1}{\rho} \right) \rho_2.$$

Поступая так же для остальных гирек, для спиртомера с гирькой 0 имеем следующие два уравнения:

$$m + m_{10} = \left( v_0 + v_c + \frac{m_{10}}{\rho} \right) \rho_{10}$$

и

$$m + m_{10} = \left( v_0 + \frac{m_{10}}{\rho} \right) \rho_B.$$

В составленные выше уравнения не были введены члены, учитывающие влияние мениска на глубину погружения спиртомера. Это объясняется тем, что влияние изменения массы мениска в разных предельных спиртах по сравнению с первым предельным спиртом, по которому подгоняется шкала спиртомера при его изготовлении, может быть компенсировано соответствующим изменением массы гирек, полученной расчетным путем (см. далее).

Кроме того, в полученных уравнениях не принято во внимание действие выталкивающей силы на выступающую из жидкости часть стержня, что в рассматриваемом случае вполне допустимо, так как обусловленная этим погрешность пренебрежимо мала (лишь в пятом десятичном знаке значения плотности спирта).

В общем виде уравнения равновесия спиртомера с  $k$ -й гирькой при погружении его до верхней отметки в  $k$ -й предельный спирт плотностью  $\rho_k$  и до нижней отметки в  $(k+1)$ -й предельный спирт плотностью  $\rho_{k+1}$  можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} m + m_k &= \left( v_0 + v_c + \frac{m_k}{\rho} \right) \rho_k; \\ m + m_k &= \left( v_0 + \frac{m_k}{\rho} \right) \rho_{k+1}. \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

После соответствующих преобразований получим:

$$\frac{1}{\rho_k} = \frac{1}{\rho} + \sqrt[11]{\left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)^{11-k} \left( \frac{1}{\rho_n} - \frac{1}{\rho} \right)^k}. \quad (1-19)$$

Формула (1-19) позволяет определить значения плотности предельных спиртов в зависимости от плотности исходного предельного спирта. В табл. 1-5 принята плотность исходного спирта  $\rho_0 = 794,11 \text{ кг/м}^3$ .

Таблица 1-5

**Плотность предельных спиртов**

Номер спирта	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Номер спирта	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	811,00	6	900,31
2	828,21	7	919,19
3	845,74	8	938,11
4	863,60	9	957,98
5	881,78	10	977,91

Далее рассмотрим расчет значений плотности, соответствующих промежуточным отметкам шкалы спиртомера. Обозначим плотность раствора, в котором спиртомер погружается до  $n$ -й отметки через  $\rho_n$ . Так как шкала разделена на 100 частей, объем погруженной части стержня с участком шкалы на длине  $n$  отметок составит  $n v_c / 100$ , тогда уравнение равновесия спиртомера примет вид:

$$m = \left( v_0 + \frac{n}{100} v_c \right) \rho_n,$$

откуда

$$\rho_n = \frac{A}{B + n}, \quad (1-20)$$

где  $A = \frac{100m}{v_c}$ ;  $B = \frac{100v_0}{v_c}$ .

Значения  $A$  и  $B$  можно найти из условия, что в предельном спирте плотностью  $\rho_k$  спиртомер погружается до крайней верхней (т. е. 100-й) отметки, а в спирте плотностью  $\rho_{k+1}$  — до нулевой отметки, следовательно,

$$\rho_k = \frac{A}{B + 100} \text{ и } \rho_{k+1} = \frac{A}{B}.$$

Решив эти равенства совместно, найдем:

$$A = \frac{100\rho_k\rho_{k+1}}{\rho_{k+1} - \rho_k}$$

и

$$B = \frac{100\rho_k}{\rho_{k+1} - \rho_k}.$$

Подставив полученные выражения в (1-20), получим уравнение для определения плотности  $\rho_k, n$  спиртового раствора, в котором спиртомер с  $k$ -й гирькой погружается до некоторой промежуточной отметки  $n$  шкалы, считая от нулевой отметки:

$$\rho_k, n = \frac{\rho_k\rho_{k+1}}{\rho_k + \frac{n}{100}(\rho_{k+1} - \rho_k)}. \quad (1-21)$$

Формула (1-21) в сочетании с формулой (1-19) позволяет связать между собой показание по равномерной условной шкале спиртомера и концентрацию раствора.

К числу основных конструктивных параметров металлического спиртомера относятся масса и общий объем спиртомера, объем верхнего стержня и массы гирек. Для определения массы и объема спиртомера служат уравнения (1-16) и (1-17), причем одну из трех искомым величин  $m$ ,  $v_0$  или  $v_c$  выбирают произвольно. Обычно масса спиртомера находится в пределах 28—30 г.

Для определения массы гирек заменим в системе (1-18)  $v_0 + v_c$  и  $v_0$  соответственно на  $\frac{m}{\rho_0}$  и  $\frac{m}{\rho_1}$  из уравнений (1-16) и (1-17), тогда, приняв во внимание зависимость (1-19), получим следующее уравнение:

$$m_k = m(\alpha_p^k - 1), \quad (1-22)$$

где

$$\alpha_p = \sqrt[11]{\frac{1/\rho_0 - 1/\rho}{1/\rho_B - 1/\rho}}$$

Значения массы гирек, подсчитанные по уравнению (1-22) для спиртомеров с массой в диапазоне 28—30 г, приведены в ГОСТ 3638-53 в виде таблицы. Данные этой таблицы учитывают также поправки на влияние мениска, о которых говорилось ранее.

Как видим, массы гирек зависят от массы самого спиртомера, в связи с чем гирьки, относящиеся к определенному спиртомеру, нельзя применять с другим спиртомером.

Недостатком металлических спиртомеров (рабочих и образцовых 2-го разряда) является непостоянство показаний. Поэтому были предложены стеклянные спиртомеры по типу металлических (т. е. с гирьками) [66].

Образцовый металлический спиртомер 1-го разряда по форме подобен рабочему металлическому, но не имеет шкалы и гирек. Отличительной особенностью спиртомера 1-го разряда является высокая чувствительность, которая достигается тем, что верхний стержень выполнен в виде удлиненного цилиндра малого диаметра (1,5—1,7 мм).

Спиртомер 1-го разряда представляет собой комплект из двух одинаковых приборов с круговой отметкой на верхнем стержне; у одного прибора отметка нанесена в верхней части стержня, у другого — в нижней, причем под каждой из этих отметок предусмотрена дополнительная, контрольная риска, которая служит для лучшей ориентировки при погружении спиртомера. Массы спиртомеров подобраны таким образом, что в одном и том же спиртовом растворе (первом предельном спирте) каждый прибор погружается до отметки. Применение одновременно двух спиртомеров позволяет легко обнаруживать расслоение раствора, являющееся следствием плохого перемешивания.

Спиртомер 1-го разряда служит для проверки правильности нанесения крайних отметок шкалы у образцовых 2-го разряда и рабочих металлических спиртомеров при их изготовлении или ремонте. Эту проверку проводят в первом предельном спирте, где спиртомер без гирьки должен погружаться до нижней отметки шкалы, а с гирькой 90 — до верхней отметки, причем показания спиртомера могут

колебаться в пределах, ограничиваемых контрольными отметками у крайних отметок шкалы.

Требуемую плотность спиртового раствора ( $\rho_1 = 811,00$  кг/м<sup>3</sup>) устанавливают по образцовому металлическому спиртомеру 1-го разряда.

## 1-5. ОСНОВЫ ПОВЕРКИ АРЕОМЕТРОВ

Проверка ареометра заключается в сличении его с другим, более точным (образцовым или эталонным) ареометром (см. ГОСТ 8263-77). Оба ареометра погружают в одну и ту же поверочную жидкость, и показания приборов сравнивают между собой. Проверка значительно упростилась бы, если бы во всех случаях ее проводили в той жидкости, для которой данный ареометр предназначен. Однако осуществить это по ряду причин не всегда возможно. Так, трудно обеспечить постоянное снабжение лабораторий морской водой или молоком для проверки соответствующих денсиметров. Некоторые жидкости (слабые растворы спирта, сахара, серной кислоты) плохо смачивают стекло, что сказывается на постоянстве показаний ареометров при повторных погружениях. Все это заставляет отказаться от использования именно тех жидкостей, для которых ареометры рассчитаны, и заменять их другими.

Для проверки ареометров применяют жидкости следующих шести групп: нефтяные смеси, водно-спиртовые растворы, серно-винные растворы, водные растворы серной кислоты (в дальнейшем именуемые серно-водными растворами), водные растворы морской соли, растворы Туле (водные растворы комплексной соли  $K_2HgJ_4$ ).

Для приготовления нефтяных смесей применяют в зависимости от требуемой плотности петролейный эфир по ГОСТ 11992-66 (плотность 0,650—0,695 г/см<sup>3</sup>), авиационный бензин марки Б-70 по ГОСТ 1012-72 (плотность 0,690—0,710 г/см<sup>3</sup>) и бензол по ГОСТ 5955-75 (плотность 0,880 г/см<sup>3</sup>); допускается также использовать керосин.

Водно-спиртовые растворы готовят из этилового спирта-ректификата (ГОСТ 5962-67) и дистиллированной воды (ГОСТ 6709-72).

Серно-винный раствор представляет собой смесь<sup>1</sup> 85%-ного спирта-ректификата с химически чистой серной кислотой плотностью 1,84 г/см<sup>3</sup> (ГОСТ 4204-66). Эта смесь обладает рядом отличительных свойств, благодаря которым ей во многих случаях отдается предпочтение перед другими жидкостями. К числу таких свойств относятся: весьма хорошая смачиваемость стекла, что обеспечивает правильность измерений; сравнительно малый мениск (капиллярная постоянная серно-винного раствора невелика и почти не зависит от концентрации раствора), благодаря чему случайная неправильность в образовании мениска лишь незначительно отражается на показании ареометра; охват широкого интервала значений плотности — от 0,845 (85%-ный спирт) до 1,840 г/см<sup>3</sup> (концентрированная серная кислота); хорошая сохранность в течение долгого времени.

Для приготовления серно-водных растворов используют химически чистую серную кислоту и дистиллированную воду. Растворы морской соли готовят путем добавления в дистиллированную

<sup>1</sup> Состав смеси выбран таким потому, что для данного состава известны капиллярные постоянные.

## Жидкости для поверки ареометров

Ареометры	Пределы измерений	Поверочные жидкости
Образцовые 1-го и 2-го разрядов и рабочие денсиметры общего назначения	0,65—0,86 г/см <sup>3</sup>	Петролейный эфир, бензин, бензол и их смеси
	0,87—0,95 г/см <sup>3</sup>	Водно-спиртовые растворы
	0,96—1,01 г/см <sup>3*</sup>	Серно-винные растворы
	1,00—1,83 г/см <sup>3</sup>	Серно-водные растворы
Образцовые денсиметры 1-го разряда для морской воды	1,84—2,00 г/см <sup>3</sup>	Растворы Туле
	1,00—1,04 единиц относительной плотности	Серно-винные растворы
Образцовые 2-го разряда и рабочие лактоденсиметры	1,015—1,040 г/см <sup>3</sup>	То же
Нефтеденсиметры	0,65—0,86 г/см <sup>3</sup>	Петролейный эфир, бензин, бензол и их смеси
	0,87—0,95 г/см <sup>3</sup>	Водно-спиртовые растворы
	0,96—1,01 г/см <sup>3</sup>	Серно-винные растворы
Денсиметры для морской воды	1,00—1,04 единиц относительной плотности	Водные растворы морской соли и серно-винные растворы
Урометры	1,00—1,05 г/см <sup>3</sup>	Серно-водные растворы
Аккумуляторные денсиметры	1,00—1,30 г/см <sup>3</sup>	То же
Денсиметры АК	1,53—1,63 г/см <sup>3</sup>	То же
Образцовые 1-го и 2-го разрядов и рабочие стеклянные спиртомеры	0—96%	Водно-спиртовые растворы
	Свыше 96 до 100% и от 100 до 105 условных единиц	Смеси бензина с бензолом
Образцовые 1-го и 2-го разрядов и рабочие сахарометры	0—80%	Серно-водные растворы
Образцовые 2-го разряда и рабочие металлические спиртомеры	20—110 условных единиц	Водно-спиртовые растворы
Образцовые 2-го разряда и рабочие клеометры	0—50%	Серно-винные растворы
Гидрометры	20—100%	Серно-водные растворы

\* Для рабочих денсиметров — до 1,00 г/см<sup>3</sup>.

Примечание. При поверке рабочих ареометров бензол, учитывая его токсичность, можно заменить трансформаторным маслом [137].

воду предварительно профильтрованного насыщенного раствора (в дистиллированной воде) морской соли.

Растворы Туле образуют раствором двуокисной ртути HgJ<sub>2</sub> (ГОСТ 3206-46) и иодистого калия KJ (ГОСТ 4232-74) в дистиллированной воде.

Жидкости для поверки образцовых и рабочих ареометров различных типов выбирают в соответствии с табл. 1-6. Денсиметры общего назначения для жидкостей легче воды поверяют в тех же жидкостях, что и нефтеденсиметры. Применение водно-спиртовых растворов для поверки нефтеденсиметров в интервале плотности 0,87—0,95 г/см<sup>3</sup> объясняется тем, что в этом интервале спиртовые растворы близки по капиллярным свойствам к нефтяным жидкостям. Нефтяные жидкости такой плотности непрозрачны, весьма вязки и не могут служить для поверочных целей.

Для поверки нефтеденсиметров в интервале плотности 0,96—1,01 г/см<sup>3</sup> применяют серно-винные растворы, так как различие капиллярных постоянных этих растворов и нефтяных жидкостей незначительно. Водно-спиртовые растворы столь большой плотности не могут использоваться при поверке из-за плохого смачивания стекла.

При поверке денсиметров общего назначения в интервале плотности 1,00—1,83 г/см<sup>3</sup> применяют серно-водные растворы, так как эти денсиметры служат главным образом для измерения плотности водных растворов кислот, солей и щелочей, которые близки по капиллярным свойствам к растворам серной кислоты. Серно-винные растворы в данном случае непригодны: их капиллярная постоянная сильно отличается от капиллярной постоянной раствора серной кислоты.

По той же причине урометры, аккумуляторные денсиметры, денсиметры АК, сахарометры и гидрометры поверяют в серно-водных растворах, а не в серно-винных.

Для поверки лактоденсиметров используют серно-винные растворы, так как в этом случае поправка на капиллярность меньше, чем при поверке в серно-водных растворах.

Для составления раствора (смеси) требуемой плотности делают приблизительный расчет объемного количества смешиваемых жидкостей. Рассмотрим этот расчет в общем виде.

Пусть требуется приготовить раствор плотностью  $\rho$  из жидкостей плотностью  $\rho_1 > \rho$  и  $\rho_2 < \rho$ . Искомые объемы смешиваемых жидкостей обозначим соответственно через  $V_1$  и  $V_2$ , тогда, предположив, что объем смеси равен сумме объемов смешиваемых жидкостей, можно записать следующее уравнение равенства масс:

$$V_1\rho_1 + V_2\rho_2 = (V_1 + V_2)\rho,$$

откуда

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\rho - \rho_2}{\rho_1 - \rho}. \quad (1-23)$$

Таким образом, объемы смешиваемых жидкостей должны быть обратно пропорциональны разностям между значениями плотности жидкостей и требуемого раствора. Необходимо подчеркнуть, что расчет дает лишь приблизительные результаты, так как в большинстве случаев объем смеси не равен сумме объемов смешиваемых жидкостей. Для получения раствора требуемой плотности к раствору, составленному из расчетных количеств жидкостей, постепенно

прибавляют некоторое количество той или иной жидкости, входящей в состав раствора, и при этом контролируют плотность при помощи ареометра. Поэтому при расчете объемов смешиваемых жидкостей плотность достаточно учитывать с двумя десятичными знаками.

Рассмотрим, каким образом можно точно определить расчетным путем требуемые объемы смешиваемых жидкостей при составлении водно-спиртового раствора концентрацией  $q$ , % по объему, из двух водно-спиртовых растворов концентрацией  $q_1$  и  $q_2$ , % по объему, плотности которых равны  $\rho_1$  и  $\rho_2$ .

Обозначим значения массовой концентрации, соответствующие известным значениям объемной концентрации через  $p$ ,  $p_1$  и  $p_2$ , а объемы смешиваемых растворов — через  $V_1$  и  $V_2$ .

Масса раствора концентрацией  $p_1$  равна  $V_1\rho_1$ , и в нем содержится  $\frac{V_1\rho_1 p_1}{100}$  единиц массы безводного спирта. Масса раствора

концентрацией  $p_2$  равна  $V_2\rho_2$ , причем в нем содержится  $\frac{V_2\rho_2 p_2}{100}$  единиц массы безводного спирта. Так как общая масса смеси равна  $V_1\rho_1 + V_2\rho_2$ , то ее концентрация

$$p = \frac{V_1\rho_1 p_1 + V_2\rho_2 p_2}{V_1\rho_1 + V_2\rho_2},$$

откуда

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2 - p}{p - p_1} \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (1-24)$$

Как видим, для подсчета объемов смешиваемых растворов необходимо предварительно определить их плотности и перевести объемную концентрацию в массовую.

Если обе части выражения (1-24) умножить на  $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ , то получим отношение масс

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{p_2 - p}{p - p_1}, \quad (1-25)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  — массы растворов концентрацией  $q_1$  и  $q_2$ , % по объему.

Некоторые образцовые денсиметры 1-го разряда поверяют весовым способом, применяя только одну поверочную жидкость [65, 183]. Плотность жидкости, соответствующую поверяемой отметке шкалы денсиметра, определяют из результатов взвешивания денсиметра в воздухе и в поверочной жидкости при погружении денсиметра до этой отметки. По результатам взвешиваний находят потерю в весе денсиметра, равную весу вытесненной им жидкости. Зная плотность, определяют объем жидкости, равный объему погруженной части денсиметра, и по его массе находят плотность той жидкости, в которой денсиметр должен свободно погружаться до этой отметки.

Проверка денсиметра сводится к взвешиванию его в воздухе, определению потери в весе при погружении в поверочную жидкость

и измерении плотности этой жидкости эталонным денсиметром. В качестве поверочной жидкости применяют бензол, так как он не изменяет плотности при испарении, хорошо смачивает стекло, обладает малым поверхностным натяжением и малой вязкостью<sup>1</sup>. При проверке денсиметра для жидкостей легче бензола к денсиметру подвешивают дополнительный груз.

## Глава вторая

### АРЕОМЕТРЫ ПОЛНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

Как видно из гл. 1, показания ареометров частично погружения зависят от поверхностного натяжения жидкости, которое в свою очередь определяется рядом факторов и, как правило, является переменной величиной. Исключить влияние капиллярных явлений позволяют ареометры полного погружения (в дальнейшем для краткости называемые погружными ареометрами).

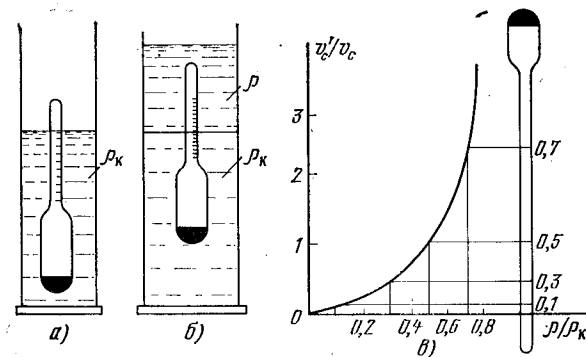


Рис. 2-1. Погружной ареометр.

*a* — в контрольной жидкости; *b* — в двух жидкостях; *в* — градуировочная кривая.

В качестве погружного ареометра можно использовать прибор, конструктивно выполненный как обычный ареометр частичного погружения, если испытуемую жидкость наливать в высокий цилиндр поверх другой, более тяжелой жидкости с известной плотностью, не реагирующей и не смешивающейся с данной жидкостью. При этом ареометр погружается полностью и находится ча-

<sup>1</sup> Хорошие результаты дает также нонан ( $\rho_{20} = 718$  кг/м<sup>3</sup>) [268].

стично в нижней (контрольной) жидкости и частично в испытуемой. Искомую плотность отсчитывают по месту пересечения шкалы границей раздела жидкостей (рис. 2-1,б) [283]. Уравнения равновесия ареометра сначала в одной (контрольной) жидкости, а затем в двух жидкостях запишутся в виде

$$M = (V - v_c) \rho_k; \quad (2-1)$$

$$M = [V - (v_c + v'_c)] \rho_k + (v_c + v'_c) \rho, \quad (2-2)$$

где  $M$ ,  $V$  — масса и объем ареометра;  $v_c$  — объем выступающей части стержня при погружении в контрольную жидкость плотностью  $\rho_k$  (рис. 2-1,а);  $v'_c$  — объем части стержня, всплывающей (над границей раздела жидкостей) при частичном погружении ареометра в испытуемую жидкость плотностью  $\rho < \rho_k$  (рис. 2-1,б).

Из уравнений (2-1) и (2-2) получаем соотношение

$$\rho / \rho_k = \frac{v'_c / v_c}{1 + v'_c / v_c}, \quad (2-3)$$

которое используют для построения шкалы ареометра (рис. 2-1,в).

Описанный прибор обладает особыми преимуществами при измерении плотности сжиженных газов (контрольной жидкостью служит вода), так как не требуется коррекция показаний даже при высоком давлении газа над жидкостью. Диапазон измерений таким прибором весьма широкий: от 0 до 13600 кг/м<sup>3</sup>.

Одна из разновидностей погружного ареометра представляет собой поплавок (например, из кварца) с крючком внизу, на который навешена калиброванная металлическая цепочка с постоянной массой единицы длины (рис. 2-2). Другой конец цепочки свободно лежит на дне цилиндра. Масса поплавка должна быть такой, чтобы он полностью погружался и находился внизу цилиндра в равновесном положении в исходной жидкости, плотность которой равна нижнему пределу измерений прибора. При возрастании плотности жидкости поплавок всплывает, оставаясь погруженным, и поднимает часть цепочки до тех пор, пока ее увеличивающийся вес не станет равным приросту выталкивающей силы.

Таким образом, положение поплавка, обычно измеряемое катетометром, служит мерой плотности жидкости.

Для того чтобы ареометр мог охватывать достаточно широкий интервал плотностей при сравнительно малой длине цепочки, вверху поплавка предусматривается короткий выступ для надевания кольцеобразных гирь. Если плотность жидкости велика, то поплавок всплывает на поверхность жидкости и для его полного погружения на стержень надевают соответствующую гирю. Тот

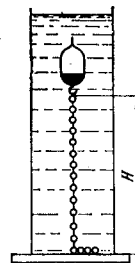


Рис. 2-2. Одноцепочковый ареометр.

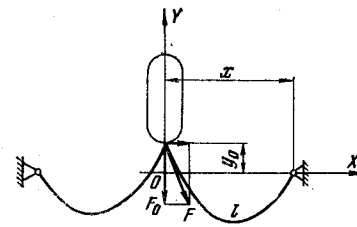


Рис. 2-3. Многоцепочковый ареометр.

же эффект достигается применением сменных цепочек различной массы.

Из уравнения равновесия ареометра легко получить следующее выражение для искомой плотности:

$$\rho = \frac{M + mH}{V + mH/\rho_c}, \quad (2-4)$$

где  $M$ ,  $V$  — масса и объем поплавка;  $m$  — масса единицы длины цепочки;  $\rho_c$  — плотность материала цепочки;  $H$  — длина свободно свисающей части цепочки, являющаяся мерой плотности жидкости.

В выражении (2-4) все величины, кроме  $H$ , являются константами прибора. Разделив числитель и знаменатель на  $V$ , после преобразований с учетом того, что  $mH/V\rho_c \ll 1$  (при соответствующем выборе констант), получим:

$$\rho = \rho_0 + \frac{mH}{V} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}\right), \quad (2-5)$$

где  $\rho_0 = \frac{M}{V}$  — плотность жидкости, в которой поплавок

(без цепочки) находится в безразличном равновесии. Обычно эту плотность принимают за нижний предел измерений ареометра,

Погрешность цепочкового ареометра составляет  $\pm 0,2\%$  и менее. У цепочкового ареометра в качестве меры плотности можно принимать и глубину погружения вершины поплавка относительно верхнего края цилиндра [соответственно изменяются и формулы (2-4), (2-5)].

Особенно целесообразно применять цепочковые ареометры для измерения плотности сжиженных газов, так как в этом случае ареометры частичного погружения дают значительную погрешность: поверхностное натяжение жидкости изменяется в зависимости от давления; выталкивающая сила, создаваемая газовой фазой над жидкостью, также зависит от переменного давления. Очевидно, что для сжиженных газов применяют цилиндр с двойными стенками (наподобие сосуда Дьюара) и герметичной крышкой. Цепочковый ареометр эффективен и в других случаях, когда испытуемая жидкость находится в закрытой полости.

Для придания поплавку устойчивости и обеспечения его центрирования применяют несколько цепочек (обычно от двух до четырех), причем свободные их концы фиксируются неподвижно (рис. 2-3). От каждой цепочки на поплавок действует сила  $F$ , направленная по касательной к цепной линии и зависящая от длины цепочки. Вертикальная составляющая  $F_0$  этой силы, компенсирующая изменение выталкивающей силы при изменении плотности жидкости, зависит от хода  $y_0$  поплавка в соответствии с уравнением [32]

$$F_0 = 0,5mg(l + y_0 \operatorname{cth} \nu), \quad (2-6)$$

где  $m$  — масса единицы длины цепочки;  $l$  — длина цепочки, а величина  $\nu$  определяется из соотношения

$$\frac{\operatorname{sh} \nu}{\nu} = \frac{\sqrt{l^2 - y_0^2}}{x}$$

Представляющая практический интерес замена уравнения (2-6) линейным уравнением

$$F_0 = 0,5mg(l + y_0) \quad (2-7)$$

дает погрешность, которая зависит от величин  $y_0$ ,  $l$  и  $l/x$ . Погрешность тем меньше, чем больше отношение  $l/x$  и меньше ход поплавка.

Для расширения диапазона измерений ареометра необходимо увеличить массу цепочки, применяя для ее

изготовления материал с большой плотностью, например платину или золото; увеличение диаметра проволоки в этом случае нецелесообразно, так как цепочка получается громоздкой, массивной и может потребоваться увеличение объема поплавка, что, однако, вызовет уменьшение диапазона измерений. Другой путь — подвешивание в середине тонкой цепочки дополнительного груза [32].

Нагружение поплавка можно осуществлять и другим способом — при помощи эластичной винтовой спирали  $I$  из кварцевой нити, свободно соединенной с поплавком  $2$  (рис. 2-4). Поплавков подбирают так, чтобы его плотность была несколько меньше минимальной плотности жидкости, т. е. чтобы спираль испытывала растягивающее напряжение. В этом случае изменение длины спирали  $\Delta L$  определяется изменением температуры  $\Delta t$  и плотности жидкости  $\Delta \rho$ :

$$\Delta L = a\Delta t + b\Delta \rho, \quad (2-8)$$

причем в больших диапазонах температур и длин

$$a = \left(\frac{\partial L}{\partial t}\right)_\rho = \operatorname{const} \text{ и } b = \left(\frac{\partial L}{\partial \rho}\right)_t = \operatorname{const}.$$

Значения  $a$  и  $b$  устанавливают экспериментально путем измерения при разных температурах величины  $\Delta L$  в жидкостях известной плотности. Тогда можно записать следующее выражение для искомой плотности:

$$\rho_t = \rho + \frac{a(t_0 - t) - (L_0 - L)}{b}, \quad (2-9)$$

где  $L$  — длина спирали в испытуемой жидкости плотностью  $\rho_t$  при температуре  $t$ ;  $L_0$  — то же в контрольной жидкости плотностью  $\rho_0$  при температуре  $t_0$ .

Размеры спирали и поплавка могут быть весьма малыми: объем поплавка — около  $1 \text{ см}^3$ , диаметр витка спирали  $10 \text{ мм}$ , начальная длина  $40 \text{ мм}$ , диаметр кварцевой нити  $0,2 \text{ мм}$ . Чувствительность системы  $5 \text{ см}^4/\text{г}$ . Эту чувствительность можно существенно повысить, если, во-первых, увеличить объем поплавка и, во-вторых,

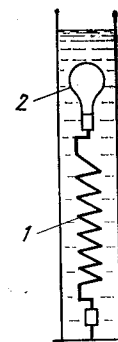


Рис. 2-4. Пружинный ареометр.



подогнать его плотность так, чтобы она лишь незначительно отличалась от плотности жидкости. Однако одновременно соответственно уменьшится диапазон измерений.

Изменение длины спирали фиксируют при помощи катетометра.

## Глава третья

### ПОПЛАВКОВО-ВЕСОВЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

#### 3-1. ПРИНЦИП ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ

Метод гидростатического взвешивания основан на использовании закона Архимеда. Так как на погруженное в жидкость тело действует выталкивающая сила, пропорциональная плотности жидкости, то в результате взвешивания в жидкости тела с известным объемом можно найти массу жидкости в объеме тела, а отсюда — плотность жидкости.

Для измерения плотности твердого тела методом гидростатического взвешивания тело последовательно взвешивают в воздухе и в жидкости известной плотности. По результатам этих взвешиваний определяют массу и объем тела, а следовательно, его плотность.

Введем следующие обозначения:  $M$  — масса испытуемого тела;  $V_t$  — его объем при температуре  $t$ ;  $V_{t_1}$  — то же при температуре  $t_1$ ;  $m_t$ ,  $v_t$  — масса<sup>1</sup> и объем гирь, уравновешивающих тело в воздухе плотностью  $D_1$  при температуре  $t_1$ ;  $m_{т.ж}$ ,  $v_{т.ж}$  — масса и объем гирь, уравновешивающих тело в жидкости при температуре  $t$ ;  $\beta_t$  — коэффициент объемного теплового расширения тела;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости, в которую погружают тело, при температуре  $t$ ;  $\rho_t$  — искомая плотность тела при температуре  $t$ ;  $D_2$  — плотность воздуха при взвешивании тела в жидкости;  $\rho_r$  — плотность материала гирь.

Учитывая действие выталкивающих сил, приложенных к телу и к гирям, уравнения равновесия весов при взвешивании тела сначала в воздухе при температуре  $t_1$ ,

а затем в жидкости при температуре  $t$  записывают в следующем виде<sup>1</sup> (множитель  $g$  всюду опущен):

$$\left. \begin{aligned} M - V_{t_1} D_1 &= m_t - v_t D_1; \\ M - V_t \rho_{ж} &= m_{т.ж} - v_{т.ж} D_2. \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

Заменяя  $v_t$  и  $v_{т.ж}$  соответственно на  $m_t/\rho_r$  и  $m_{т.ж}/\rho_r$  и учитывая, что  $V_{t_1} = V_t [1 + \beta_t(t_1 - t)]$ , получаем:

$$\left. \begin{aligned} M - V_t D_1 [1 + \beta_t(t_1 - t)] &= m_t (1 - D_1/\rho_r); \\ M - V_t \rho_{ж} &= m_{т.ж} (1 - D_2/\rho_r). \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

Из первого уравнения (3-2), отбрасывая малое слагаемое  $V_t D_1 \beta_t(t_1 - t)$ , находим выражение для определения массы тела:

$$M = m_t (1 - D_1/\rho_r) + V_t D_1. \quad (3-3)$$

Вычтем из первого уравнения (3-2) второе и пренебрежем членом, содержащим произведение  $D_1 \beta_t$  (ввиду его малости), тогда объем тела при температуре  $t$

$$V_t = \frac{m_t (1 - D_1/\rho_r) - m_{т.ж} (1 - D_2/\rho_r)}{\rho_{ж} - D_1}. \quad (3-4)$$

Искомая плотность тела при температуре  $t$  определится делением массы на объем при той же температуре. Разделив уравнение (3-3) на (3-4), получим:

$$\rho_t = \frac{m_t (1 - D_1/\rho_r) (\rho_{ж} - D_1)}{m_t (1 - D_1/\rho_r) - m_{т.ж} (1 - D_2/\rho_r)} + D_1. \quad (3-5)$$

Из уравнения (3-5) видно, что для определения плотности тела при заданной температуре необходимо, чтобы жидкость, в которой проводят взвешивание, имела указанную температуру. В принципе можно взвешивать тело в жидкости любой температуры, отличающейся от заданной для определения плотности (например, при температуре помещения, что весьма удобно), но в этом случае должен быть известен коэффициент теплового расширения исследуемого вещества, что позволило бы учесть соответствующее изменение объема.

<sup>1</sup> Влияние выталкивающей силы, связанной с погружением в жидкость проволоки, на которой подвешивается тело, а также капиллярных сил, действующих на проволоку, исключается путем взвешивания проволоки, погруженной в жидкость (см. далее).

<sup>1</sup> Здесь и всюду далее (без специального указания) подразумевается, что масса дается с учетом поправки по свидетельству на гири.

Если плотность воздуха при обоих взвешиваниях можно считать неизменной ( $D_1=D_2=D$ ) или ее можно усреднить, то уравнения (3-3) — (3-5) принимают вид:

$$M = m_r(1 - D_{от}) + V_t D; \quad (3-6)$$

$$V_t = (m_r - m_{г.ж}) \frac{1 - D_{от}}{\rho_{ж} - D}; \quad (3-7)$$

$$\rho_t = \frac{m_r}{m_r - m_{г.ж}} (\rho_{ж} - D) + D, \quad (3-8)$$

где  $D_{от} = D/\rho_r$  — отношение плотностей воздуха и материала гирь.

Уравнение (3-8) после простого преобразования может быть приведено к виду

$$\rho_t = \frac{m_r \rho_{ж} - m_{г.ж} D}{m_r - m_{г.ж}}. \quad (3-9)$$

Плотность воздуха, входящую в приведенные выше уравнения, при точных измерениях вычисляют по формуле

$$D_{t,B} = \frac{1,2930 (B - \varphi P_{в.п})}{760 (1 + 0,00366t)} + \varphi \rho_{в.п}, \quad (3-10)$$

где  $B$  — барометрическое давление, мм рт. ст.;  $t$  — температура, °C;  $\varphi$  — относительная влажность, выраженная в долях единицы;  $P_{в.п}$  и  $\rho_{в.п}$  — парциальное давление и плотность насыщенного водяного пара при температуре  $t$ , определяемые из табл. 3-1 [115]. Расчет по формуле (3-10) дает значение плотности в  $\text{кг/м}^3$ .

Формула (3-10) справедлива для атмосферного воздуха с объемным содержанием  $\text{CO}_2$  0,04% ( $D_0 =$

Таблица 3-1

Давление и плотность насыщенного водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{в.п}, \text{мм рт. ст.}$	$\rho_{в.п}, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$P_{в.п}, \text{мм рт. ст.}$	$\rho_{в.п}, \text{кг/м}^3$
15	12,8	0,013	21	18,6	0,018
16	13,6	0,014	22	19,8	0,019
17	14,5	0,014	23	21,1	0,021
18	15,5	0,015	24	22,4	0,022
19	16,5	0,016	25	23,8	0,023
20	17,5	0,017			

$= 1,2930 \text{ кг/м}^3$  при  $B=760$  мм рт. ст.). Вычисленные по этой формуле значения плотности сухого воздуха в зависимости от температуры и давления приведены в приложении 2.

В качестве примера определим плотность сухого воздуха при  $B=752$  мм рт. ст. и  $t=20,4^\circ\text{C}$ . При  $t=20$  для  $B_1=750$  и  $B_2=760$  находим  $D_1=1,189$  и  $D_2=1,205$ , т. е.  $\Delta D=0,016$ . В примечании к приложению (графе для  $\Delta D=0,016$ ) при  $\Delta B=752-750=2$  получаем поправку 0,003, т. е.  $D_{20; 752}=1,189+0,003=1,192$ .

Аналогично при  $t=21$  получим  $D_{21; 752}=1,185+0,003=1,188$ , отсюда  $\Delta'D=1,192-1,188=0,004$  и в соответствующей графе примечания для  $\Delta t=20,4-20=0,4^\circ\text{C}$  находим поправку 0,002, откуда  $D_{20,4; 752}=1,192-0,002=1,190 \text{ кг/м}^3$ .

При весьма точных измерениях следует иметь в виду, что в закрытых помещениях воздух может содержать повышенное количество  $\text{CO}_2$ ; соответствующее увеличение плотности  $D_0$  воздуха учитывают введением поправки, равной  $0,0064x$ , где  $x$  — содержание  $\text{CO}_2$ , % по объему [206].

Всего метод измерения плотности воздуха описан в работе [148].

При измерении плотности жидкости в качестве вспомогательного тела используют цилиндрический стеклянный поплавок с закругленными краями, снабженный сверху крючком (петлей) для подвешивания к проволоке, соединенной с чашкой весов. Поплавки изготавливают из термометрического стекла с известным коэффициентом теплового расширения. Внутри поплавка в нижней его части помещен балласт (например, свинцовая дробь), закрепленный связующим веществом (смолкой).

При прецизионных измерениях применяют поплавки в виде тела геометрически правильной формы — шара, цилиндра или куба [145]. Поплавки для высоких температур изготавливают из термоустойчивых материалов — кварца, нержавеющей стали, платины, вольфрама, молибдена, инвара, графита и др.

При выборе объема поплавка исходят из того, что он должен быть, с одной стороны, большим для повышения точности измерения, а с другой — малым для уменьшения потребного количества жидкости и размеров установки. Поэтому для компромиссного решения вопроса в каждом конкретном случае руководствуются требованиями, выдвигаемыми задачей исследования. В связи с этим практически встречаются поплавки разных объемов — от одного до десятков кубических сантиметров.

Уравнение равновесия рычажных весов при взвешивании поплавка в испытуемой жидкости по аналогии со вторым уравнением (3-1) примет вид:

$$M - V_t \rho_t = m_{г.ж} - v_{г.ж} D, \quad (3-11)$$

где  $M$  — масса поплавка;  $V_t$  — его объем при температуре  $t$ ;  $\rho_t$  — искомая плотность жидкости при температуре  $t$ ;  $m_{г.ж}$  — масса гирь, уравновешивающих поплавок в жидкости;  $v_{г.ж}$  — объем этих гирь;  $D$  — средняя плотность воздуха во время взвешивания.

Учитывая, что  $v_{г.ж} = m_{г.ж} / \rho_{г.ж}$  и  $D / \rho_{г.ж} = D_{от}$ , получаем:

$$\rho_t = \frac{M - m_{г.ж} (1 - D_{от})}{V_t}. \quad (3-12)$$

Массу и объем поплавка определяют взвешиванием его сначала в воздухе, а затем в дистиллированной воде при температуре  $t$ ; соответствующие вычисления производят по формулам (3-3) и (3-4).

Плотность дистиллированной воды достаточно хорошо изучена [5], ее значения представлены в приложении 1.

Для получения достоверных данных при использовании выражения (3-12) массу и объем поплавка рекомендуется определить несколькими взвешиваниями и принять для расчетов средние значения.

Объем поплавка, входящий в выражение (3-12), не обязательно определять при той температуре  $t$ , для которой необходимо знать плотность испытуемой жидкости. Обычно удобнее взвешивать поплавок в воде при температуре, близкой к температуре помещения, так как поддерживать такую температуру постоянной значительно проще. Если температура воды, в которой взвешивают поплавок, равна  $t'$ , то уравнение равновесия весов запишется в виде

$$M - V' \rho'_{в} = m'_{г.в} (1 - D_{от}), \quad (3-13)$$

где  $\rho'_{в}$  — плотность воды при температуре  $t'$ ;  $V'$  — объем поплавка при температуре  $t'$ ;  $m'_{г.в}$  — масса гирь, уравновешивающих поплавок в воде при температуре  $t'$ .

Так как

$$V' = V_t [1 + \beta (t' - t)],$$

где  $\beta$  — коэффициент объемного теплового расширения материала поплавка, то, вычитая уравнение (3-13) из

уравнения (3-6), получаем выражение для нахождения объема поплавка при температуре  $t$

$$V_t = \frac{(m_{г.в} - m'_{г.в}) (1 - D_{от})}{\rho'_{в} [1 + \beta (t' - t)] - D}. \quad (3-14)$$

В тех случаях, когда масса и объем поплавка неизвестны заранее, удобнее пользоваться выражением (3-12), преобразованным таким образом, чтобы в него входили только величины, являющиеся результатом прямых измерений. Подставив в уравнение (3-12) значения  $M$  и  $V_t$  из выражений (3-6) и (3-7), найдем:

$$\rho_t = \frac{m_{г.в} - m_{г.ж}}{m_{г.в} - m_{г.ж}} (\rho_{в} - D) + D. \quad (3-15)$$

Соответственно, когда поплавок взвешивают в воде при температуре  $t'$ , из уравнений (3-6), (3-12) и (3-14) получаем:

$$\rho_t = \frac{m_{г.в} - m_{г.ж}}{m_{г.в} - m'_{г.в}} [\rho'_{в} [1 + \beta (t' - t)] - D] + D. \quad (3-16)$$

### 3-2. МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ВЕСЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Гидростатическое взвешивание в зависимости от требуемой точности выполняют на технических 1-го класса, аналитических или образцовых весах [62]. Весы оснащают простейшим дополнительным устройством, показанным на рис. 3-1,а; подставку под цилиндр изготовляют из любого материала и устанавливают так, чтобы чашка весов могла свободно передвигаться вниз и вверх. Цилиндр должен быть такого диаметра, чтобы тело свободно (с зазором в несколько сантиметров) проходило в него.

Более хорошие результаты могут быть получены на весах, установленных таким образом, чтобы жидкость помещалась под весами. Для этого к одной чашке весов снизу прикрепляют оканчивающийся крючком подвес, свободно проходящий через отверстие в основании витрины весов и в столе (рис. 3-1,б). Подвес уравновешивают грузом, помещенным на другую чашку.

Для взвешивания в жидкости поплавок (или испытуемое тело в специальном держателе) прикрепляют на проволоке к крючку подвеса весов. Проволока должна быть очень тонкой и прямой, чтобы уменьшить влияние поверхностного натяжения жидкости. Рекомендуется применять платиновую или платино-иридиевую проволоку

диаметром до 0,2 мм, так как она хорошо выпрямляется путем прокаливания при легком натяжении над пламенем горелки. При работе с агрессивной жидкостью материал проволоки должен быть устойчивым против воздействия этой жидкости. Длину проволоки рассчитывают так, чтобы в жидкость погрузилась лишь небольшая ее

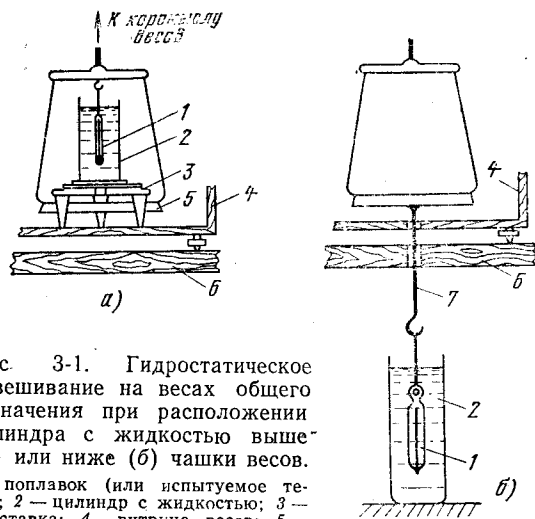


Рис. 3-1. Гидростатическое взвешивание на весах общего назначения при расположении цилиндра с жидкостью выше (а) или ниже (б) чашки весов.  
1 — поплавок (или испытуемое тело); 2 — цилиндр с жидкостью; 3 — подставка; 4 — витрина весов; 5 — чашка; 6 — крышка стола; 7 — подвес.

часть (около 15 мм), при этом уменьшение веса проволоки в жидкости сведется к минимуму.

При гидростатическом взвешивании необходимо поддерживать постоянную температуру жидкости. Изменение температуры жидкости во время взвешивания приводит к изменению плотности жидкости и объема взвешиваемого тела, что нарушает равновесие весов. Для поддержания постоянной температуры применяют водяную ванну большого объема (20—25 л), обернутую снаружи теплоизоляционным материалом (войлоком, ватой). Регулирование температуры ванны производят добавлением небольших количеств горячей воды или льда. Воду в ванне необходимо перемешивать мешалкой. Более надежные результаты дает термостат с автоматическим регулятором температуры, при этом во избежание сотрясения весов следует на время взвешивания выключать электродвигатель термостата.

Для изоляции от воздействия окружающих предметов на установку весы целесообразно устанавливать не на столе, а на лабораторном шкафу с дверками, помещая в шкаф сосуд с жидкостью. Для предохранения весов от сотрясений стол (шкаф) рекомендуется располагать на фундаменте или кронштейнах, смонтированных в стену.

Перед заполнением жидкостью цилиндр промывают серной кислотой, большим количеством воды и просушивают. Поплавок (тело) до погружения в жидкость промывают в спирте и высушивают; при

взвешивании в нефтяной жидкости для промывки используют бензин. Проволоку, на которой подвешивают поплавок (тело), термометры и мешалки также следует промыть и просушить. Платиновую проволоку необходимо прокалить.

Для опускания поплавка (тела) в жидкость цилиндр с жидкостью предварительно выдвигают из-под стола (шкафа). Для этой же цели можно применить устройство, поднимающее цилиндр (см., например, [167], где описано сильфонное подъемное устройство).

После взвешивания погруженного в жидкость поплавка (тела) с проволокой взвешивают отдельно проволоку, подвешенную к крючку весов и погруженную в жидкость; таким образом определяют массу гирь, уравнивающих поплавок (тело). При этом, если тело имеет сравнительно большой объем, то для взвешивания проволоки его следует оставить в жидкости, чтобы не изменился ее уровень.

Необходимо следить за тем, чтобы на поверхности поплавка (тела) и на погруженной в жидкость части проволоки не оседали пузырьки воздуха.

При измерении плотности вязких жидкостей процесс достижения равновесия поплавка и системы взвешивания может оказаться весьма длительным, поэтому целесообразно пользоваться методом динамического взвешивания, производя серию последовательных измерений при малой скорости перемещения поплавка, обеспечивающей ламинарное движение [139, 168]. По экспериментальным данным фиксируют зависимость скорости перемещения поплавка вверх и вниз (при установившемся движении и постоянной температуре жидкости) и нагрузкой на весы. Скорость перемещения оценивают числом делений шкалы весов в единицу времени. Экстраполяция полученной графической зависимости, соответствующей данной температуре, позволяет найти массу поплавка в состоянии статического равновесия системы при нулевой скорости перемещения.

Для исключения влияния неравноплечести весов пользуются способом взвешивания на одном плече [62, 133]: сначала поплавок (тело) уравнивают какой-либо тарой, помещаемой на другую чашку весов, а затем заменяют гирями до восстановления равновесия. Тем самым находят массу  $m_T$  гирь, уравнивающих тело в воздухе. Далее снова заменяют гири телом и опускают его в жидкость. Для восстановления нарушенного равновесия добавляют соответствующее количество гирь. Масса этих гирь (без поправки на потерю веса в воздухе) за вычетом массы проволоки покажет массу вытесненной телом жидкости, т. е. она будет равна разности  $m_T - m_{г.ж}$ . Это значение используют для вычисления плотности тела по формуле (3-8).

Аналогичным образом находят разности  $m_T - m_{г.ж}$ ,  $m_T - m_{г.в}$  и  $m_T - m'_{г.в}$ , входящие в выражения (3-15) и (3-16) для определения плотности жидкости.

Измельченное (порошковое) вещество при взвешивании помещают в специальную тарелку (чашку), которую

предварительно уравнивают грузом. Если плотность тела меньше плотности жидкости, в которой производят взвешивание, то к телу при взвешивании в жидкости добавляют утяжеляющий груз и соответственно учитывают это при определении  $m_{г.ж}$ .

В качестве рабочей жидкости для измерения плотности твердого вещества используют воду (если вещество в ней не растворяется и не окисляется), спирт, бензин, толуол, бензол, четыреххлористый углерод или другую соответствующую жидкость известной плотности [64, 125]. Эта жидкость должна быть химически инертной по отношению к исследуемому веществу, малолетучей, маловязкой, обладать хорошей и неизменной смачивающей способностью, т. е. малым поверхностным натяжением<sup>1</sup> (см. введение), а ее плотность должна быть постоянной и меньше плотности вещества. Если плотность жидкости неизвестна, то ее предварительно измеряют одним из описанных выше способов.

При использовании жидкостей, плотность которых изменяется во времени (из-за летучести, абсорбирования посторонних частиц и т. д.) или по высоте столба (из-за испарения с поверхности), для повышения точности измерений к цилиндру для жидкости присоединяют двумя боковыми отводами внизу и вверху другой такой же цилиндр. Цилиндры образуют сообщающиеся сосуды, и их совместно помещают в термостатную ванну. В одном цилиндре подвешен на проволоке весов держатель с испытуемым телом, а в другом находится кварцевый поплавок, размеры и масса которого подобраны так, чтобы он был в безразличном равновесии в рабочей жидкости требуемой температуры (см. § 3-6). Плотность поплавка, определяемая гидростатическим взвешиванием в воде, позволяет судить о плотности рабочей жидкости в цилиндре на уровне размещения испытуемого тела.

В процессе взвешивания тела (поплавка) наблюдают за температурой термостатной ванны и жидкости в цилиндре. Как правило, температуру измеряют до и после каждого взвешивания, принимая в расчет среднее из этих значений.

Модификацией метода гидростатического взвешивания является измерение плотности жидкости, помещен-

<sup>1</sup> Например, фтороуглерод ( $\rho_{20}=1700$  кг/м<sup>3</sup>) обладает в 5 раз меньшим поверхностным натяжением, чем вода.

ной в сосуд, который подвешен к чашке весов и полностью погружен во вспомогательную жидкость известной плотности. В этом случае схема измерений аналогична схеме определения плотности твердого тела. Такой способ находит применение при измерении плотности жидких металлов и сплавов с высокой температурой плавления. В качестве сосуда используют платиновый тигель, а вспомогательной жидкостью служит масло или расплавленная соль.

Для получения надежных результатов гидростатическое взвешивание рекомендуется повторять несколько раз, определяя затем среднее арифметическое из найденных значений.

При очень высоких температурах диаметр проволоки для подвешивания поплавка с целью повышения ее прочности приходится увеличивать до 0,5 мм и более, поэтому в уравнении (3-11) нельзя пренебрегать поверхностным натяжением и его зависимостью от температуры. Для исключения влияния капиллярных явлений можно применять дифференциальный способ, производя последовательные измерения с двумя поплавками разных масс, подвешенными на проволоке одного и того же диаметра [246]. В этом случае формула (3-12) принимает вид:

$$\rho_t = \frac{M'' - M' + (m'_{г.ж} - m''_{г.ж})(1 - D_{от})}{V''_t - V'_t}, \quad (3-17)$$

где верхние индексы при буквах соответствуют первому и второму поплавкам.

Другая разновидность дифференциального способа основана на использовании вертикального цилиндрического поплавка из огнеупорного материала с вольфрамовым утяжелителем внутри, частично погружаемого в исследуемую жидкость на различную глубину, причем глубину погружения изменяют вертикальным перемещением (на известное расстояние) цилиндра с жидкостью [143]. В этом случае уравнение (3-12) запишется в виде<sup>1</sup>

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{\Delta v} (1 - D_{от}) + D,$$

<sup>1</sup> В [143] приведена неточная формула, так как не учтены выталкивающая сила воздуха и другие величины.

где  $m_1, m_2$  — массы гирь, уравновешивающих поплавков при двух его последовательных взвешиваниях в жидкости;  $\Delta v$  — изменение объема погруженной части поплавка, определяемое из соотношения  $\Delta v = \pi r^2 R^2 H / (R^2 - r^2)$ ; здесь  $r$  — радиус цилиндрической поверхности поплавка;  $R$  — внутренний радиус цилиндра с жидкостью;  $H$  — перемещение цилиндра.

Дифференциальные способы гидростатического взвешивания целесообразно использовать также при измерении малой разности плотностей, в частности для исследования температурной зависимости плотности жидкости. Сущность одного из таких способов состоит в том, что два приблизительно одинаковых по объему поплавка из термостойчивых материалов подвешивают на тонких нитях к чашкам микроаналитических весов и весы уравновешивают. Затем поплавок опускают в цилиндры с исследуемой жидкостью, причем температуру в одном из них поддерживают несколько более высокой, чем в другом [146]. Для приведения весов в равновесие на чашку с поплавком «холодного» (контрольного) цилиндра кладут груз массой  $m$ , который компенсирует разницу между выталкивающими силами, действующими на поплавок. Соответствующее уравнение имеет вид:

$$V_k \rho_k - V_t \rho_t = m(1 - D_{от}),$$

где  $V_k$  и  $V_t$  — объемы «холодного» (контрольного) и «горячего» поплавков;  $\rho_k$  и  $\rho_t$  — плотности жидкости в «холодном» и «горячем» цилиндрах, тогда искомая плотность

$$\rho_t = \frac{V_k \rho_k - m(1 - D_{от})}{V_t} \quad (3-18)$$

Объемы поплавков определяют гидростатическим взвешиванием [уравнение (3-14)]. Измерительная установка может быть герметизирована и снабжена дистанционным управлением, что позволяет проводить исследования при высоких давлениях и температурах.

Измерения можно также производить при постоянном грузе  $m$ , восстанавливая равновесие весов путем изменения температуры жидкости в контрольном цилиндре.

Разновидность дифференциального способа, основанная на использовании двух приблизительно одинаковых по массе и объему поплавков, предназначена в основном для измерения плотности растворов в зависимости от концентрации. Оба цилиндра с исходной жидкостью и погруженными в нее поплавками выдерживают в термостате при требуемой температуре, после чего уравновешивают весы наложением груза  $m_1$  на соответствующую чашку. Добавляя в один из цилиндров определенное количество растворимого вещества, получают более концентрированную жидкость большей плотности, в связи с чем увеличивается выталкивающая сила, действующая на соответствующий поплавок, и для восстановления равновесия весов накладывают груз  $m_2$  (вместо  $m_1$ ). Уравнения равновесия для обоих случаев запишутся в виде

$$M_1 - V_1 \rho_1 + m_1(1 - D_{от}) = M_2 - V_2 \rho_2;$$

$$M_1 - V_1 \rho + m_2(1 - D_{от}) = M_2 - V_2 \rho;$$

где  $M_1$  и  $M_2$  — массы поплавков;  $V_1$  и  $V_2$  — их объемы;  $\rho_1$  и  $\rho$  — плотности исходной жидкости и раствора, тогда

$$\rho = \rho_1 + \frac{(m_2 - m_1)(1 - D_{от})}{V_1} \quad (3-19)$$

Для повышения чувствительности и точности при измерении плотности твердых тел также применяют дифференциальные способы гидростатического взвешивания. С этой целью к одной чашке весов подвешивают испытуемое тело, а к другой — его «макет», объем и масса которого практически те же, что и у тела, и определены заранее [89, 241, 272]. Тело и макет сначала уравновешивают в воздухе, а затем в контрольной жидкости, налитой в сообщающиеся сосуды, которые находятся в термостатированной ванне. Массу  $M$  и объем  $V$  тела вычисляют по уравнениям

$$\left. \begin{aligned} M &= M_m + m_r(1 - D_{от}) + \frac{(m_r - m_{r.ж})D}{\rho_{ж} - D}; \\ V &= V_m + \frac{(m_r - m_{r.ж})(1 - D_{от})}{\rho_{ж} - D}, \end{aligned} \right\} \quad (3-20)$$

где  $M_m, V_m$  — масса и объем макета.

Дифференциальные способы особенно полезны при измерении малых изменений плотности больших образцов твердого вещества.

При контроле плотности твердых образцов изделий в серийном производстве установка с гидростатическими весами может быть автоматизирована [234]. Партию образцов устанавливают в стойке, откуда специальный механизм поочередно захватывает их и переносит в весовое устройство для последовательного взвешивания в воздухе и воде. В течение цикла измерения длительностью 20 с производятся следующие операции: захват образца, перенос и установка его на подвес весового устройства, подъем сосуда с водой для погружения подвеса с образцом в воду, опускание сосуда, захват и возвращение образца в стойку, повторный подъем сосуда для погружения подвеса без образца, опускание сосуда, подача следующего образца к механизму захвата. При этом последовательно выполняются взвешивания подвеса в воздухе, подвеса с образцом в воздухе и в воде, подвеса без образца в воде. Взвешивание производится полупроводниковым датчиком со схемой термокомпенсации. Предусмотрена автоматическая обработка данных измерений с помощью специализированной ЭЦВМ.

В другой автоматической установке [99] имеются два устройства для взвешивания образца соответственно в воздухе и жидкости; это позволяет повысить точность, так как подвеска первых весов не смачивается жидкостью, а подвеска вторых всегда опущена в жидкость. Автомат оснащен цифроречитавшим устройством для регистрации результата измерения на бумажной ленте.

Гидростатическое взвешивание на весах общего назначения обладает рядом преимуществ перед пикнометрическим методом (см. гл. 4). Основное из них связано с возможностью обеспечить лучшее термостатирование и более точное измерение температуры жидкости (термометр все время находится в испытуемой жидкости, причем частое перемешивание ее позволяет исключить образование слоев с разной температурой). Именно благодаря этому метод гидростатического взвешивания применяется при эталонировании ареометров [39].

Гидростатическое взвешивание позволяет измерять плотность жидкостей с погрешностью до 0,001%; однако при высоких температурах погрешность возрастает [167]. При термостатировании в пределах  $\pm 0,002^\circ\text{C}$  можно измерять плотность твердого вещества с погрешностью до  $\pm 0,0001\%$  [48, 206].

Метод гидростатического взвешивания применяют и для сжиженных газов [126, 168], а также для вязких жидкостей [168].

В сравнении с пикнометрическим методом гидростатическое взвешивание характеризуется простотой и быстротой выполнения измерений. В то же время гидростатическое взвешивание по ряду характеристик (точности, воспроизводимости и др.) уступает пикнометрическому методу. Одним из основных источников погрешностей при гидростатическом взвешивании является влияние поверхностного натяжения и вязкости жидкости, снижающее чувствительность весов, т. е. точность взвешивания.

Наличие большой открытой поверхности жидкости и необходимость ее перемешивания делают невозможным использование данного метода для измерения плотности легко испаряющихся жидкостей. К числу его отрицательных сторон относится и то, что для измерений требуется сравнительно большое количество жидкости.

### 3-3. КОРОМЫСЛОВЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

При массовых измерениях плотности методом гидростатического взвешивания, когда существенную роль играют простота и быстрота измерений, а также в ряде других случаев (например, при высоких давлениях) вместо весов общего назначения применяют коромысловые плотномеры различных разновидностей.

Широкое использование для измерения плотности жидкостей и твердых тел находят коромысловые плотномеры, называемые гидростатическими весами. Эти плотномеры являются простыми по конструкции и удобными в обслуживании приборами. Существенное их

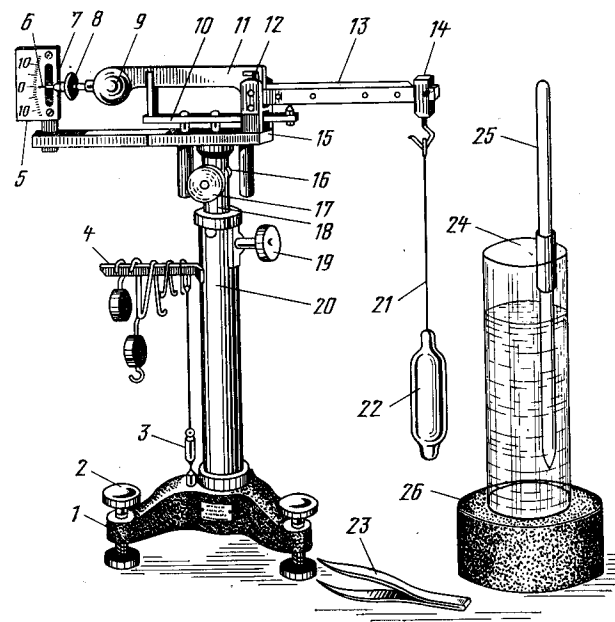


Рис. 3-2. Гидростатические весы ВГ-2 для жидкостей и твердых тел.

преимущество состоит в том, что для измерения требуется сравнительно небольшое количество вещества. Гидростатическими весами можно непосредственно измерять плотность жидкостей, вязкость которых при температуре измерения не превышает примерно 10 Ст ( $0,001 \text{ м}^2/\text{с}$ ), а также твердых тел. Погрешность измерения  $\pm (0,05—0,1)\%$ .

Гидростатические весы состоят из опорной части, коромысла, поплавка и набора гирь-рейтеров (рис. 3-2). В опорной части имеется стойка 20, основание 1 которой снабжено одной неподвижной и двумя винтовыми 2 ножками для установки весов на столе в правильное положение по отвесу 3.

Внутри стойки помещен выдвижной стержень 18, фиксируемый в требуемом положении рукояткой 19. Стержень несет на себе вил-

ку 15, в которой укреплены опорная подушка коромысла и неподвижный указатель равновесия в виде зеркальной шкалы 5 с нулем посередине.

Коромысло 11 представляет собой неравноплечий рычаг, опирающийся призмой 12 на подушку в вилке. На правом конце коромысла укреплена грузоприемная призма, к которой подвешена серьга 14 с крючком. К крючку на константановой проволоке 21 диаметром 0,1 мм и длиной 100 мм подвешен стеклянный поплавок 22. На левом конце коромысла помещены неподвижный противовес 9, уравновешивающий в воздухе коромысло с поплавком, подвижный указатель равновесия — стрелка 6 и резьбовой наконечник 7 с гайкой 8 для регулирования равновесного положения коромысла («нулевой» точки весов).

В правую часть коромысла заделано полотно 13, на котором нанесена шкала из 10 равных делений. Начало шкалы совпадает с рабочим ребром опорной призмы коромысла, конец — с рабочим ребром грузоприемной призмы, к которой подвешена серьга. Промежуточные отметки шкалы образованы перпендикулярными надрезами, пронумерованными в последовательном порядке цифрами от 1 до 9; на эти надрезы навешивают гири-рейтеры, которые снимают с углублений на полке 4, прикрепленной к стойке.

В набор гири-рейтеров входят пять гирь — две большие и три малые. Масса каждой большой гири условно принята равной единице, масса остальных гирь соответственно равна 0,1; 0,01; 0,001.

Плотномер оснащен изолирующим устройством в виде скобы 10 на штоке, который перемещается в вертикальном направлении внутри стержня 18 при помощи рукоятки 17 и фиксируется эксцентриком 16.

К прибору прилагаются стеклянный стакан 24 объемом 100 см<sup>3</sup> для исследуемой жидкости, термометр 25 в специальной гильзе, прикрепляемой к верхнему краю стакана, подставка 26 под стакан, пинцет 23 для навешивания гирь и запас проволоки.

Плотномер хранят в прямоугольном футляре 160×295×400 мм с двумя выдвижными полками; коромысло, серьга, поплавок, термометр, гири и пинцет укладывают в гнезда верхней полки, а стойку весов устанавливают на нижней полке. Стакан и подставку крепят на боковых стенках футляра.

Основные технические характеристики плотномера: пределы измерений 0,2—2 г/см<sup>3</sup>; допускаемая погрешность показаний ±0,0005 г/см<sup>3</sup>; цена деления условной шкалы указателя равновесия 0,0002—0,0004 г/см<sup>3</sup>; вариация показаний — не более 0,5 цены деления шкалы указателя; расстояние между отметками шкалы 1 мм; объем поплавка (10±0,5) см<sup>3</sup>, масса 25±1 г; пределы измерений термометра 0—40°C, его цена деления 1°C, предельная погрешность ±0,5°C; масса (с футляром) 5,8 кг.

Гири-рейтеры к плотномеру могут иметь также форму, показанную на рис. 3-3 (числа указывают условную массу гирь).

У некоторых типов плотномеров коромысло выполнено без надрезков; для навешивания гири-рейтеров служат боковые призмы, расположенные перпендикулярно телу коромысла и прикрепленные к нему гайками. Рабочее ребро каждой призмы обращено вверх. Такое коромысло обеспечивает более стабильные показания прибора.

Известны конструкции плотномеров, у которых термометр впаивают в тело поплавка.

Действие гидростатических весов основано на том, что поплавок, подвешенный к серьге коромысла и уравновешивающий его в воздухе, при погружении в жидкость «теряет» некоторую часть своего веса, равную весу жидкости в объеме поплавка, при этом нарушается равновесие коромысла. Для восстановления равновесия на коромысло навешивают соответствующие гири-рейтеры.

Поскольку вес жидкости в объеме поплавка зависит от его плотности, количество и положение гирь (т. е. показание прибора) также зависят от плотности жидкости. Уравновешивая коромысло при погружении поплавка сначала в дистиллированную воду, плотность которой известна, а затем в испытуемую жидкость, можно определить плотность данной жидкости.

При изготовлении плотномера массу гири 1 подготавливают равной массе дистиллированной воды в объеме поплавка при температуре 20°C (гири 1, помещенная на серьгу коромысла, восстанавливает равновесие, нарушенное погружением поплавка в воду). Масса малых гирь составляет соответственно 0,1; 0,01 и 0,001 долю массы гири 1.

Так как значения массы гирь обусловлены объемом поплавка, то поплавок и гири составляют единый комплект для данного экземпляра плотномера. Поэтому нельзя заменять поплавок или гири одного прибора поплавком или гирями другого прибора; для решения вопроса о возможности такой замены в каждом конкретном случае необходимо предварительно точно определить, какой должна быть масса недостающей гири.

При отсчете показаний плотномера учитывают условную массу гири и их положение на коромысле. Ги-

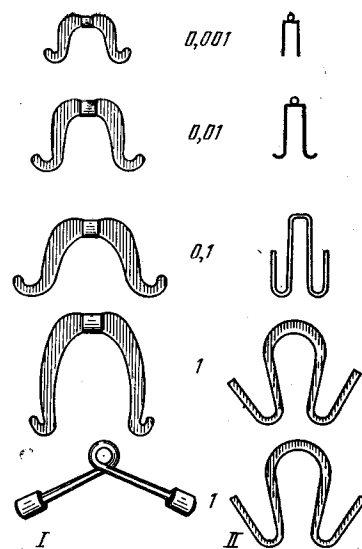


Рис. 3-3. Наборы гири-рейтеров двух типов (I, II).



ря 1, навешенная на один из надрезов коромысла, обозначает первый десятичный знак (десятые доли) в показании весов, причем число единиц равно цифре, указанной на коромысле у данного надреза. Остальные гири, навешенные на надрезы коромысла, в зависимости от их условной массы обозначают последующие десятичные знаки (сотые, тысячные и десятитысячные доли). Так, если гиря 1 висит, например, на седьмом надрезе коромысла, гиря 0,1 — на пятом, гиря 0,01 — на четвертом, а гиря 0,001 — на третьем надрезе, то показание  $n$  прибора будет состоять из следующих слагаемых:

$$n = 1 \frac{7}{10} + 0,1 \frac{5}{10} + 0,01 \frac{4}{10} + 0,001 \frac{3}{10} = 0,7543.$$

Для жидкостей, плотность которых больше единицы, перед уравновешиванием коромысла к серье подвешивают гирю 1 и показания плотномера отсчитывают так же, как было объяснено выше, но к результату добавляют единицу. Если, например, при уравновешивании коромысла после погружения поплавка в жидкость одна гиря 1 подвешена к серье, вторая гиря 1 и гиря 0,1 помещены на первый надрез, гиря 0,01 — на второй и гиря 0,001 — на третий надрез, то показание

$$n = 1 + 1 \frac{1}{10} + 0,1 \frac{1}{10} + 0,01 \frac{2}{10} + 0,001 \frac{3}{10} = 1,1123.$$

Показание плотномера дает только приближенное значение плотности. Объясняется это следующим:

первоначальное уравновешивание коромысла поплавком осуществляют в воздухе, а не в пустоте, следовательно, при этом не учитывается потеря веса поплавка в воздухе;

масса гири 1 подгоняется так, что при погружении поплавка в дистиллированную воду, имеющую температуру  $20^\circ\text{C}$ , показание весов равно 1, т. е. оно не соответствует плотности воды при этой температуре ( $0,9982 \text{ г/см}^3$ );

подбор поплавка и регулирование плотномера производят при  $20^\circ\text{C}$ , тогда как на практике его применяют для определений плотности при различных температурах, что вызывает изменение объема поплавка, а следовательно, и веса вытесненной жидкости.

Поэтому при измерении плотности в отсчитанное показание прибора следует ввести соответствующие поправки.

Выведем уравнение, устанавливающее связь между плотностью испытуемой жидкости и показанием плотномера. Схематически три взвешивания, выполняемых последовательно при определении плотности жидкости, показаны на рис. 3-4.

Введем следующие дополнительные обозначения:  $m_1, m_2, m_3, m_4$  — массы гирь 1, 0,1, 0,01 и 0,001;  $v_1 - v_4$  — их объемы;  $m'$  и  $v'$  — масса и объем серьи с подвешенной к ней проволокой;  $m_{01}$  и  $v_{01}$  — масса<sup>1</sup> и объем левого плеча коромысла с противовесом;  $m_{02}$  и  $v_{02}$  — масса<sup>1</sup> и объем правого плеча коромысла;  $\rho_{20}$  — плотность испытуемой жидкости при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;  $\rho'_{20}$  — плотность дистиллированной воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;  $a$  — капиллярная постоянная воды;  $a_{ж}$  — то же жидкости;  $d$  — диаметр проволоки, на которой подвешен поплавок;  $n_{20}$  — показание прибора при погружении поплавка в жидкость с температурой  $20^\circ\text{C}$ .

Уравнение равновесия коромысла с поплавком в воздухе (рис. 3-4, а) имеет вид<sup>2</sup>:

$$(m_{01} - v_{01}D)l_{01} = (m_{02} - v_{02}D)l_{02} + [m + m' - (v_{20} + v')D]l. \quad (3-21)$$

<sup>1</sup> Приложена в центре тяжести плеча.

<sup>2</sup> Силы тяжести заменяем соответствующими массами, учитывая, что ускорение свободного падения при взвешивании в одном и том же месте не меняется.

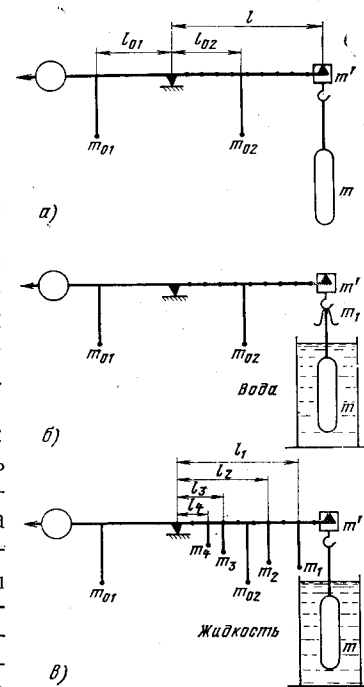


Рис. 3-4. Схема последовательных уравновешиваний коромысла весов.

а — поплавок в воздухе; б — поплавок в воде; в — поплавок в испытуемой жидкости.

В месте соприкосновения проволоки поплавка с поверхностью воды, в которую он погружен, образуется мениск, масса которого (см. § 1-1) согласно формуле (1-1) равна  $\pi da \rho'_{20}$ . Тогда уравнение равновесия коромысла с поплавком, погруженным в воду (рис. 3-4,б), когда к грузоприемной серьге подвешена гири 1 имеет вид:

$$(m_{01} - v_{01}D)l_{01} = (m_{02} - v_{02}D)l_{02} + \pi da (\rho'_{20} - D)l + [m + m' + m_1 - (v_1 + v')D - v_{20}\rho'_{20}]l. \quad (3-22)$$

Для случая погружения поплавка в жидкость легче воды (рис. 3-4,в) аналогично найдем:

$$(m_{01} - v_{01}D)l_{01} = (m_{02} - v_{02}D)l_{02} + \pi da_{ж}(\rho_{20} - D)l + (m + m' - v_{20}\rho_{20} - v'D)l + (m_1 - v_1D)l_1 + (m_2 - v_2D)l_2 + (m_3 - v_3D)l_3 + (m_4 - v_4D)l_4. \quad (3-23)$$

После соответствующих преобразований, решая совместно уравнения (3-21) — (3-23), получаем:

$$m_1 - v_1D = (v_{20} - \pi da)(\rho'_{20} - D); \quad (3-24)$$

$$m_1 - v_1D = \frac{1}{n_{20}}(v_{20} - \pi da_{ж})(\rho_{20} - D). \quad (3-25)$$

Уравнение (3-24) устанавливает зависимость между объемом поплавка и массой гири 1.

Приравняв правые части уравнений (3-24) и (3-25), получим выражение для определения плотности жидкости по показанию прибора.

$$\rho_{20} = \frac{v_{20} - \pi da}{v_{20} - \pi da_{ж}}(\rho'_{20} - D)n_{20} + D \text{ [г/см}^3\text{]}. \quad (3-26)$$

Значения капиллярной постоянной для некоторых жидкостей приведены в [62].

Легко показать, что формула (3-26) справедлива и при определении плотности жидкостей тяжелее воды. Более удобно пользоваться несколько видоизмененной формулой

$$\rho_{20} = \frac{1 - \pi da/v_{20}}{1 - \pi da_{ж}/v_{20}}(\rho'_{20} - 20)n_{20} + D,$$

откуда, пренебрегая малыми величинами второго порядка, получаем:

$$\rho_{20} = A(\rho'_{20} - D)n_{20} + D, \quad (3-27)$$

где

$$A = 1 - \frac{\pi d}{v_{20}}(a - a_{ж}).$$

Расчеты показывают, что для жидкостей, близких по капиллярным свойствам к воде, при диаметре проволоки поплавок не более 0,2 мм  $A \approx 1$ , причем ошибка не превышает примерно 0,0001 даже у плотномера с небольшим поплавком объемом 5 см<sup>3</sup> (у плотномера ВГ-2 объем поплавка 10 см<sup>3</sup>). Для этих случаев получаем следующую формулу, которую широко применяют в практике пользования гидростатическими весами:

$$\rho_{20} = (\rho'_{20} - D)n_{20} + D. \quad (3-28)$$

Так как  $\rho'_{20} = 0,9982$  г/см<sup>3</sup> и  $D = 0,0012$  г/см<sup>3</sup>, то

$$\rho_{20} = 0,9970n_{20} + 0,0012. \quad (3-29)$$

Формулу (3-29) можно записать в виде

$$\rho_{20} = n_{20} - (0,0030n_{20} - 0,0012),$$

откуда

$$\rho_{20} = n_{20} - C_{п}, \quad (3-30)$$

причем

$$C_{п} = 0,0030n_{20} - 0,0012$$

представляет собой поправку, которую нужно вычесть из показания прибора, чтобы получить значение плотности жидкости.

Таблица 3-2

Поправка к показаниям коромыслового плотномера

$n_{20}$	$C_{п}$ , г/см <sup>3</sup>	$n_{20}$	$C_{п}$ , г/см <sup>3</sup>
0,5	0,0003	1,3	0,0027
0,6	0,0006	1,4	0,0030
0,7	0,0009	1,5	0,0033
0,8	0,0012	1,6	0,0036
0,9	0,0015	1,7	0,0039
1,0	0,0018	1,8	0,0042
1,1	0,0021	1,9	0,0045
1,2	0,0024	2,0	0,0048

Как видно из формулы, поправка  $C_{п}$  зависит только от показания плотномера; она одинакова для различных жидкостей и может быть заранее вычислена для различных значений  $n_{20}$  (табл. 3-2). Для промежуточных

значений поправку определяют линейным интерполированием с округлением до единицы четвертого десятичного знака.

Обычно температура жидкости при измерении плотности не равна 20°C, т. е. действительный объем поплавка, погруженного в жидкость, отличается от того объема, по которому регулировали прибор. В этом случае

$$\rho_t = (0,9970n_t + 0,0012) [1 + \beta(20 - t)], \quad (3-31)$$

где  $\rho_t$  — плотность жидкости при температуре  $t$ ;  $n_t$  — показание прибора при температуре  $t$ .

Полученное выражение аналогично формуле (3-29) и отличается от нее только множителем, учитывающим изменение объема поплавка. Практически формулой (3-31) целесообразно пользоваться при измерении плотности жидкости, температура которой отличается от 20°C более чем на  $\pm 5^\circ\text{C}$ ; ошибка, связанная с тепловым расширением поплавка, может составлять (на каждые 10°C) до пяти единиц четвертого десятичного знака при плотности, близкой к 2 г/см<sup>3</sup>, и до 2,5 единицы при плотности порядка 1 г/см<sup>3</sup>.

Описанному коромысловому плотномеру присущ тот недостаток, что его показание не равно измеряемой плотности жидкости и для определения плотности приходится производить некоторые дополнительные вычисления. Однако от этого неудобства легко избавиться, если изменить систему регулирования прибора: когда поплавок находится в воздухе, показание должно быть равно не 0, а 0,0012 (плотность воздуха при 20°C), при погружении поплавка в дистиллированную воду температурой 20°C плотномер должен показывать не 1, а 0,9982 (действительная плотность воды при этих условиях). В этом случае плотность испытуемой жидкости равна показанию прибора при погружении поплавка в жидкость (подробнее см. [138]).

Эта система регулирования плотномера обладает также тем преимуществом, что она облегчает изготовление гирь-рейтеров: масса гирь 1 в граммах должна быть численно равна объему поплавка в кубических сантиметрах.

Гиря 1, а следовательно, и остальные гири такого усовершенствованного плотномера должны быть тяжелее соответствующих гирь обычного плотномера на 0,3%. Это позволяет весьма просто осуществить регули-

рование по новой системе ранее изготовленных плотномеров.

Плотность жидкости измеряют при помощи гидростатических весов ВГ-2 в следующем порядке.

Отрегулировав при помощи установочных винтов стойки положение прибора по отвесу, вращением круглой рукоятки следует поднять вверх выдвигной стержень стойки, подвести под поплавок пустой стакан и, приподняв стакан, поставить под него подставку. Затем выдвигной стержень опускают вниз до упора<sup>1</sup>, освобождают коромысло от действия изолира и по амплитуде колебаний коромысла вверх и вниз определяют положение нулевой точки прибора по шкале указателя равновесия. Если нулевая точка прибора не совпадает с нулем шкалы, то с помощью регулировочной гайки на окончнике коромысла добиваются того, чтобы нулевая точка соответствовала показанию по шкале указателя в пределах от  $-0,2$  до  $+0,2$  (в приборах старых систем положение нулевой точки регулируют при помощи установочного винта стойки).

Температура воздуха в лаборатории должна составлять  $20 \pm \pm 5^\circ\text{C}$ .

Поднимая вверх стержень, наливают в стакан жидкость до имеющейся на нем круговой отметки и опускают стержень до отката вниз<sup>2</sup>. В жидкости и на поверхности поплавка и проволоки не должно быть пузырьков воздуха. Поплавок не должен касаться дна и стенок стакана. Перемешивая жидкость мешалкой, уравнивают коромысло гирями-рейтерами.

Гири подбирают следующим образом. Их снимают с гиревой полки и навешивают на коромысло пицетом, при этом необходимо следить за тем, чтобы не уронить гири на стол и особенно в стакан.

Нагрузочную гирю 1 вешают на крючок серьги, и медленно опуская изолир, следят за направлением отклонения коромысла, после чего снова поднимают изолир. Если стрелка коромысла перемещается вниз, значит плотность жидкости больше единицы и гирю следует оставить на крючке; если же стрелка перемещается вверх, то гирю необходимо повесить обратно на полку, так как плотность жидкости меньше единицы. Затем таким же образом вторую гирю 1 поочередно навешивают на надрезы коромысла, переходя справа налево до тех пор, пока при выключении изолира стрелка не отклонится вниз; на данным надрезе и оставляют гирю 1.

Аналогичным способом навешивают гири 0,1, 0,01 и 0,001, пока не наступит такое равновесие коромысла, при котором стрелка установится против нуля шкалы или весьма близко к нему. Закрепив коромысло изолиром, измеряют температуру жидкости и записывают показание плотномера. Искомую плотность жидкости подсчитывают по одной из следующих формул (3-27), (3-30), (3-31).

Плотность весьма вязких жидкостей может быть измерена только при повышенной температуре. Для этого жидкость в количестве 20—30 см<sup>3</sup> помещают в широкую пробирку, которую укрепляют

<sup>1</sup> В плотномерах других конструкций высоту подвижной части стойки регулируют таким образом, чтобы весь поплавок и участок проволоки длиной примерно 15—20 мм находились в стакане.

<sup>2</sup> Проволока, на которой подвешен поплавок, должна быть погружена в жидкость примерно на 15 мм.

в пробке широкогорлой колбы. В колбу вставляют также термометр, который не должен погружаться в жидкость, и трубку, соединяющую внутреннюю полость колбы с атмосферой.

Колбу до половины заполняют какой-нибудь специально подобранной жидкостью [136], кипящей при постоянной температуре, значение которой равно требуемому для измерения плотности. Колбу укрепляют в штативе и нагревают горелкой.

Пробирку погружают в колбу после того, как жидкость в колбе закипит и установится постоянная температура. Выждав несколько минут, чтобы испытуемая жидкость приняла требуемую температуру, в пробирку погружают поплавок плотномера.

При применении описанного выше плотномера для измерения плотности твердого тела к серьге коромысла

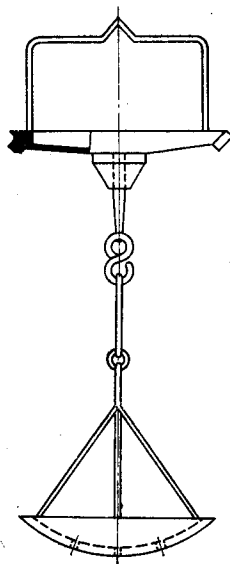


Рис. 3-5. Двойная чашка для гидростатических весов.

вместо поплавка подвешивают двойную чашку (рис. 3-5). Нижняя чашка из стекла или алюминия имеет сферическую форму и снабжена не менее чем 10 отверстиями диаметром 2 мм, равномерно распределенными по всей поверхности. Верхнюю чашку изготовляют из латуни и снабжают крючком, к которому подвешивается нижняя чашка. Очевидно, что масса тела не должна превышать разности масс поплавка и двойной чашки.

Измерения выполняют в два приема. Погрузив нижнюю чашку в дистиллированную воду при температуре 20°C, на верхнюю чашку помещают испытуемое тело и добавляют тарировочные грузы до тех пор, пока коромысло не придет в равновесие. Сняв испытуемое тело, уравновешивают коромысло при помощи гирь-рейтеров; полученное показание  $n_1$  прибора соответствует массе тела. Затем тело кладут на

нижнюю чашку, погруженную в воду, и снова уравновешивают коромысло гирями, получая показание  $n_2$ , соответствующее массе воды, вытесненной телом.

Искомую плотность тела определяют по формуле (3-29), в которую вместо  $n_{20}$  подставляют дробь  $n_1/n_2$ . Результат измерения, учитывая невысокую точность данного способа, округляют до второго десятичного знака.

В поверку гидростатических весов входят осмотр, проверка гирь и поплавка, проверка шкалы коромысла, определение чувствительности и поверка термометра.

Перед поверкой прибор устанавливают и готовят к работе, как указано выше. Стрелка указателя равновесия должна стоять против нуля шкалы. Стакан наполняют дистиллированной водой до требуемого уровня и, регулируя положение выдвинутого стержня, погружают поплавок в воду так, чтобы в ней находилась часть проволоки длиной 15—20 мм. Температура воды должна быть  $(20 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ . К крючку серьги поочередно подвешивают каждую из гирь 1. Гирь 1 признают правильными, если показание по шкале указателя равновесия находится в пределах  $\pm 0,5$  деления.

Далее способом взвешивания на одном плече определяют массу гирь-рейтеров и поплавка, причем для взвешивания применяют образцовые веса и образцовые гири. Погрешность взвешивания не должна превышать: для гирь-рейтеров 1; 0,1 и 0,01 — 0,2 мг, для гирь-рейтера 0,001 — 0,1 мг, для поплавка — 100 мг.

Разность масс двух гирь 1 не должна превышать 0,5 мг. У плотномера с поплавком объемом менее 10 см<sup>3</sup> массы гирь 0,1; 0,01 и 0,001 не должны отличаться от соответствующих расчетных значений более чем на  $\pm 0,5$  мг. У плотномера с поплавком объемом 10 см<sup>3</sup> допускаются следующие отклонения массы гирь от расчетных значений:  $\pm 0,5$  мг для гирь 0,1,  $\pm 0,3$  мг для гирь 0,01 и  $\pm 0,2$  мг для гирь 0,001. Допускаемые отклонения массы поплавка от номинального значения (25 г) составляют  $\pm 1$  г.

Расчетные значения массы гирь 0,1; 0,01 и 0,001 определяют как частное от деления средней массы двух гирь 1 соответственно на 10, 100 и 1000.

Так как масса гирь 1 равна массе воды в объеме поплавка, то объем поплавка подсчитывают по формуле

$$V = \frac{m_1}{\rho_{20}}, \quad (3-32)$$

где  $m_1$  — средняя масса двух гирь 1;  $\rho_{20} = 0,9982$  г/см<sup>3</sup> — плотность дистиллированной воды при 20°C.

При номинальном объеме поплавка 10 см<sup>3</sup> допускается отклонение действительного объема от этого значения не более чем на  $\pm 0,5$  см<sup>3</sup>.

Указания по поверке гирь усовершенствованных гидростатических весов даны в [138].

Для поверки шкалы коромысла к крючку серьги подвешивают вместо поплавка специальную чашку и гирю 1; масса чашки с гирей не должна превышать массы поплавка. Добавлением тарировочного груза на чашку добиваются равновесия коромысла с отклонением не более  $\pm 0,1$  деления шкалы указателя равновесия.

Сняв гирю 1 с серьги, навешивают ее последовательно на 9-й, 8-й и т. д. надрезы коромысла и каждый раз восстанавливают равновесие, помещая на чашку необходимые образцовые гири.

Шкала коромысла считается правильной (в данной точке), если масса гирь, помещенных на чашку, отличается от соответствующего расчетного значения не более чем на  $\pm 2$  мг. Расчетное значение массы  $m_r$  образцовых гирь, требуемых для уравновешивания весов, определяют по формуле

$$m_r = 0,1(10 - N)m_1, \quad (3-33)$$

где  $N$  — номер надреза коромысла.

Гидростатические весы для измерения плотности жидкостей при высоком давлении до 5000 кгс/см<sup>2</sup> (490 МПа) содержат (см. рис. 3-6) [123] равноплечее коромысло длиной 150 мм, нагруженное на одном конце стальным шаром объемом 1,4 см<sup>3</sup>, а на другом — дюралюминиевым цилиндром объемом 5,4 см<sup>3</sup>. Шар и цилиндр могут перемещаться вдоль коромысла. В цилиндре выполнено углубление (карман), в которое помещают дополнительные грузы для уравнивания весов при измерении плотности.

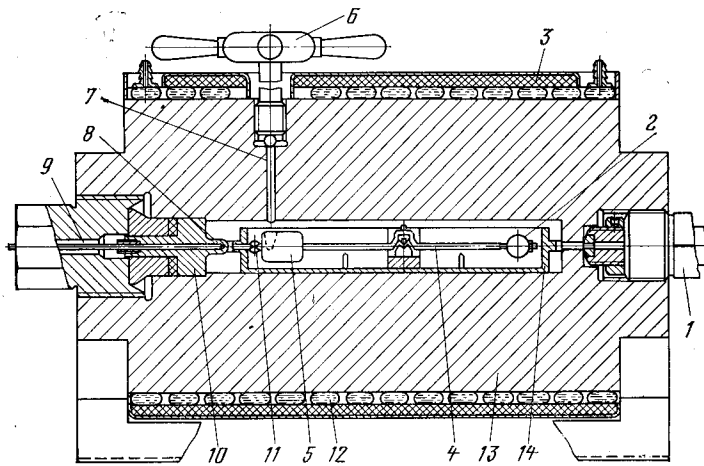


Рис. 3-6. Гидростатические весы для жидкости под давлением.

1 — патрубок; 2 — шар; 3 — тепловая изоляция; 4 — коромысло; 5 — цилиндр; 6 — вентиль; 7 — отверстие для удаления воздуха и введения шариков в канал; 8 — отросток; 9 — термопара; 10 — грибок; 11 — кварцевое окно; 12 — змеевик; 13 — корпус; 14 — лоток.

В центре коромысла предусмотрена агатовая призма. Коромысло помещено в цилиндрический латунный лоток, на дне которого имеется агатовая опорная подушка, а в торцевой стенке — неподвижный указатель. Второй (подвижный) указатель прикреплен к цилиндру.

Весы устанавливают в центральном цилиндрическом канале диаметром 25 мм толстостенного стального цилиндра наружным диаметром 160 мм и длиной 350 мм. Испытуемая жидкость под давлением поступает в канал цилиндра по патрубку, снабженному чечевичным уплотнением. С другой стороны канал закрывается уплотняющим грибком. Удаление воздуха из канала при заполне-

нии его жидкостью происходит через отверстие, закрываемое шариком при помощи вентиля.

Для визуального наблюдения за положением коромысла в корпусе прибора предусмотрены два диаметрально противоположных смотровых окна, между которыми располагаются указатели равновесия коромысла. Через одно окно производится освещение указателей, через другое — наблюдение за ними при помощи оптического устройства. Смотровые окна снабжены соответствующим уплотнением.

На цилиндр надет змеевик для подогревания жидкости, который соединен с водяным термостатом, автоматически поддерживающим в канале цилиндра требуемую температуру. Змеевик снаружи защищен тепловой изоляцией. Для измерения температуры жидкости в канале цилиндра служит термопара, помещенная внутри отростка грибка.

Принцип действия прибора состоит в следующем. Коромысло весов, помещенных в лоток с исследуемой жидкостью, находится в равновесии при атмосферном давлении и заданной температуре. При повышении давления в приборе равновесие весов нарушается, так как из-за увеличения плотности жидкости изменяется соотношение выталкивающих сил, действующих на шар и цилиндр коромысла (выталкивающая сила, приложенная к цилиндру, возрастает в большей степени, чем сила, приложенная к шару). Для восстановления равновесия коромысла цилиндр нагружают дополнительным грузом, масса которого и является мерой плотности жидкости под давлением. В качестве грузов используют металлические шарики, которые вводят в карман цилиндра через отверстие при помощи вентиля или специального электромагнитного механизма [92].

Плотномер для давления до 10 000 кгс/см<sup>2</sup> (980 МПа) аналогичен вышеописанному, но отличается тем, что исследуемая жидкость отделена от рабочей жидкости, передающей давление, а цилиндр и шар подвешены к коромыслу длиной 200 мм на призмах [21]. Положение равновесия коромысла определяется с помощью электронного индикатора, к которому подключены две катушки индуктивности; сердечниками служат стержни, закрепленные снизу коромысла по обе стороны от опоры <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В аналогичном приборе другой конструкции равновесие коромысла фиксируется с помощью сигнальной лампы, которая загорается при касании коромыслом одного из двух упоров-электроконтактов [239].

Искомая плотность  $\rho_P$  жидкости при давлении  $P$  определяется по выражению

$$\rho_P = \frac{m(\rho_r - \rho)}{m + \rho_r(V_1 - V_2)} + \rho,$$

где  $m$  — масса груза;  $\rho_r$  — плотность материала груза;  $V_1$  — объем цилиндра;  $V_2$  — объем шара;  $\rho$  — плотность жидкости при атмосферном давлении.

Погрешность измерений не превышает  $\pm 0,5$  кг/м<sup>3</sup> при вязкости жидкости не более 0,5 П. Для жидкостей большей вязкости, вызывающей потерю чувствительности коромысла весов, цилиндр на конце коромысла заменяют сильфоном, который заполняют исследуемой жидкостью. Камера сжатия, в которой уравниваются весы под давлением, заполняется маловязкой жидкостью с известной зависимостью плотности от давления, например н-гептаном или гексаном [91, 122]. Плотность определяется из соотношения

$$\rho_P = \frac{M}{V - \Delta V_P},$$

где  $M$  — масса жидкости в сильфоне;  $V$  — объем этой жидкости при атмосферном давлении и данной температуре;  $\Delta V_P$  — изменение объема при давлении  $P$ , определяемое расчетным путем.

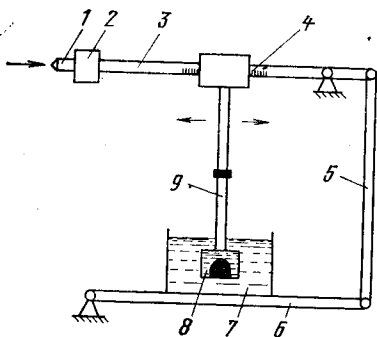


Рис. 3-7. Коромысловый плотномер для твердых тел.

1 — указатель нулевого положения; 2 — подвижный противовес; 3 — коромысло; 4 — шкала; 5 — тяга; 6 — опорный рычаг; 7 — сосуд с жидкостью; 8 — сетчатый держатель с испытуемым телом; 9 — телескопический подвес.

На рис. 3-7 показана схема коромыслового плотномера, предназначенного для измерения плотности твердых тел [199]. Его устройство основано на том, что погруженное в жидкость тело, не касающееся стенок сосуда, действует вниз на жидкость и, следовательно, на дно сосуда с силой, равной весу вытесненной жидкости. Для настройки прибора в исходное положение противовес 9 (без испытуемого тела) перемещают вдоль коромысла 3 до нуля шкалы 4 и, регулируя противовес 2, добиваются установки указателя 1 против стрелки. Поместив тело в держатель 8, смещают подвес вдоль коромысла так, чтобы указатель занял прежнее положение,

и по шкале отсчитывают искомую плотность тела. Возможны и другие модификации рычажной системы [199].

Оба уравнивания коромысла могут осуществляться автоматически с использованием электромагнита, в катушки которого подается ток от фотоэлемента или другого преобразователя, соответствующий степени разбаланса [284]. Токи, полученные при обоих взвешиваниях, автоматически сравниваются, и на выходной потенциометр выдается сигнал, пропорциональный плотности тела.

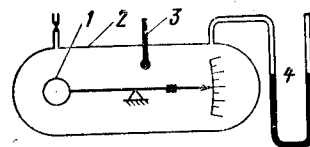


Рис. 3-8. Коромысловый плотномер для газов.

1 — шаровой поплавок; 2 — корпус; 3 — термометр; 4 — манометр.

Коромысловые плотномеры для газов (паров) обладают рядом достоинств по сравнению с объемно-весовыми плотномерами (см. гл. 4). Основные преимущества состоят в том, что не требуется измерять ни массу газа, ни вместимость сосуда, в котором газ находится, а достаточно определить выталкивающую силу, действующую на поплавок в газе. Коромысловые плотномеры отличаются также сравнительной простотой устройства и простотой пользования ими.

Для измерения плотности газа (пар) вводят внутрь герметичного корпуса плотномера, в котором помещены коромысловые весы (рис. 3-8). На одном конце легкого коромысла укреплен поплавок 1 (обычно пустотелый шар) объемом около 1 дм<sup>3</sup>, а на другом — противовес и указательная стрелка, положение которой фиксируют, например, катетометром. Если из полости 2 корпуса выкачать воздух и установить стрелку на нуль шкалы, то после заполнения корпуса испытуемым газом стрелка отклонится вниз пропорционально выталкивающей силе, действующей на шар, а следовательно, пропорционально плотности газа. Практически удобнее первое измерение проводить при заполнении корпуса сухим воздухом, а второе — газом и определять таким образом относительную плотность газа.

Измерения с помощью коромысловых плотномеров можно осуществлять и иным способом, изменяя давление в корпусе до тех пор, пока стрелка не займет исход-

ное положение. Это будет означать равенство выталкивающих сил, создаваемых воздухом и газом, а следовательно, и их плотностей при разных давлениях. Тогда на основании уравнения (В-13) при одинаковой температуре получаем выражение для относительной плотности газа

$$\frac{\rho_{н.г}}{\rho_{н.вз}} = \frac{P_{вз}K_{г}}{P_{г}K_{вз}}, \quad (3-34)$$

где  $\rho_{н.вз}$ ,  $P_{вз}$ ,  $K_{вз}$  — соответственно плотность в нормальном состоянии, давление и коэффициент сжимаемости воздуха;  $\rho_{н.г}$ ,  $P_{г}$ ,  $K_{г}$  — то же для газа.

Если пренебречь различием коэффициентов сжимаемости воздуха и испытуемого газа, то относительная плотность равна обратному отношению давлений, при которых весы приходят в равновесие.

Равновесного (нулевого) положения коромысла можно добиться также компенсационным способом при помощи электромагнита, воздействующего на вмонтированный в коромысло постоянный магнит. Амперметр, включенный в цепь питания электромагнита, градуируют в единицах плотности. Противодействующий момент сил создается дифференциальной оптико-электрической системой [245]. Существуют схемы измерений, в которых мерой плотности является момент, развиваемый электромагнитом для приведения коромысла в равновесие [277, 279]. Постоянный магнит может быть подвешен непосредственно к поплавку [212].

Погрешность измерения плотности газов и паров коромысловыми плотномерами может составлять примерно  $\pm 0,005\%$  [212]. Важным элементом коромысловых весов, влияющим на их погрешность, является опора коромысла; хорошие результаты в этом смысле дает установка коромысла на ленточных опорах, а также выполнение коромысла в виде двух спаянных накрест кварцевых нитей, из которых поперечная соединена с ножевидной призмой, опирающейся на агатовую плитку. Большое значение имеет также поддержание постоянной температуры, для чего прибор при точных измерениях целесообразно помещать в термостат.

Схему, показанную на рис. 3-8, можно видоизменить таким образом, чтобы плотность газа определять по результатам взвешивания двух тел, имеющих равные массы ( $m_1 \approx m_2$ ) и существенно различные объемы (напри-

мер,  $V_2 > V_1$ ) при условии, что эти тела окружены испытуемым газом, тогда его плотность

$$\rho = \frac{m_1 - m_2 - m_{г}}{V_1 - V_2 - v_{г}}, \quad (3-35)$$

где  $m_{г}$ ,  $v_{г}$  — масса и объем гирь, добавляемых на то плечо весов, где находится тело большего объема.

Идея этого метода в применении к точному измерению плотности воздуха выдвинута Д. И. Менделеевым, развита А. Н. Доброхотовым и в дальнейшем была усовершенствована [148, 186]. Погрешность измерений не превышает  $\pm 75 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup> [186]. Аналогичные устройства применяют и для измерения плотности газов при повышенных давлениях [277, 279].

Измерение с помощью коромысловых плотномеров можно осуществлять и другим способом: испытуемый газ вводят внутрь шарового поплавка, и плотность определяют по выталкивающей силе, действующей со стороны окружающего воздуха. Принципиальная схема такого плотномера дана на рис. 3-9, а. Коромысло 5 опирается на вилкообразную стойку двумя стальными иглами. Газ непрерывно подается в шар 1 и отводится из него по каналу в стойке и коромысле, причем для исключения влияния потока газа на положение коромысла в каждой линии предусмотрен ртутный затвор 6, который не оказывает сопротивления движению коромысла. Давление газа измеряют во входной линии, температуру — в выходной. Показание весов отсчитывают по шкале с учетом положения гирейрейтера 4. Подвижный контргруз 2 служит для смещения центра тяжести и, следовательно, для регулирования чувствительности весов; с помощью груза 3 при протекании

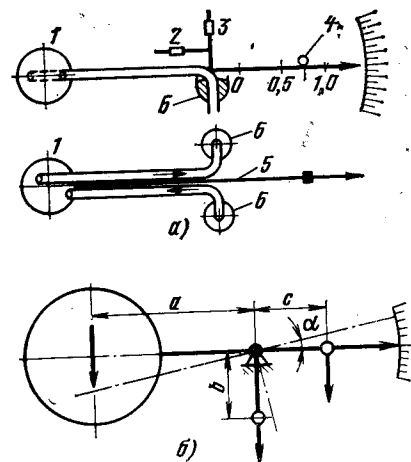


Рис. 3-9. Коромысловый плотномер с вводом газов в поплавок.  
а — принципиальная схема; б — расчетная схема.

нии воздуха через поплавки весы настраивают так, чтобы при положении рейтера на нуле стрелка стояла против нуля шкалы.

Если через прибор пропускать испытуемый газ, то стрелка отклонится от нуля в ту или иную сторону в зависимости от того, легче ли газ, чем воздух, или тяжелее. Запишем уравнения равновесия коромысла при протекании через поплавки соответственно воздуха и более тяжелого газа (рис. 3-9,б):

$$Ma = m_r c_1; \quad (3-36)$$

$$[M + V(\rho - D)]a \cos \alpha = m_r c_2 \cos \alpha + m_{п.с} b \sin \alpha, \quad (3-37)$$

где  $M$  — масса поплавка (пустого);  $m_r$  — масса гири-рейтера;  $m_{п.с}$  — масса поворотной системы (манометр, термометр и др.);  $V$  — вместимость поплавка.

Вычитая почленно уравнение (3-36) из (3-37) и обозначая  $c_2 - c_1 = \Delta c$ , получаем:

$$\rho - D = \frac{m_r}{Va} \Delta c + \frac{m_{п.с} b}{Va} \operatorname{tg} \alpha. \quad (3-38)$$

Таким образом, прибор измеряет разность плотностей газа и воздуха, которая определяется смещением  $\Delta c$  гири-рейтера и тангенсом угла наклона коромысла. Следовательно, необходимо знать плотность воздуха, а для этого — его температуру, давление и влажность.

Чувствительность весов, определяемая соотношением

$$\frac{d\alpha}{d\rho} = \frac{Va}{m_{п.с} b} \cos^2 \alpha,$$

повышается с увеличением вместимости поплавка и длины его плеча.

### 3-4. АРЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕСЫ

Упрощенными гидростатическими весами для измерения плотности тел являются так называемые *ареометрические весы*. Ареометрические весы (рис. 3-10) представляют собой металлический или (предпочтительнее) стеклянный ареометр постоянного объема (см. § 1-2), к корпусу которого снизу прикреплена дополнительная тарелка (чашка). На средней части стержня нанесена шкала или одна кольцевая метка.

Измерение плотности при помощи ареометрических весов осуществляют следующим образом. Прибор погружают в какую-нибудь вспомогательную жидкость известной плотности  $\rho_{ж}$  (например, в дистиллированную воду) и на верхнюю тарелку, находящуюся над жидкостью, помещают гири такой массы  $m_1$ , чтобы прибор погрузился до какой-либо отметки шкалы. Затем гири снимают, на верхнюю тарелку кладут испытуемое тело и добавляют гири массой  $m_2$ ,

необходимые для погружения прибора до той же отметки шкалы. Очевидно, что эти два взвешивания позволяют определить массу испытуемого тела.

Далее тело перекладывают на нижнюю погруженную в жидкость тарелку, а верхнюю тарелку нагружают гирями массы  $m_3$ , добиваясь погружения прибора до требуемой отметки шкалы. По результатам второго и третьего взвешиваний определяют массу жидкости в объеме испытуемого тела, а следовательно, и этот объем.

Если составить три уравнения равновесия весов для указанных выше последовательных взвешиваний и при этом принять, что температура  $t$  жидкости и воздуха во время измерений не изменяется, то можно получить следующее выражение для вычисления искомой плотности твердого тела:

$$\rho t = \frac{m_1 - m_2}{\frac{m_3}{\rho_{ж}} - m_2} (\rho_{ж} - D) + D. \quad (3-39)$$

При работе с прибором необходимо следить за тем, чтобы испытуемое тело при погружении во вспомогательную жидкость не загрязняло ее; в противном случае неизбежно изменение капиллярной постоянной жидкости. Если взвешивание производят в воде, то для уменьшения влияния капиллярных явлений рекомендуется поверх воды налить тонкий слой масла. Погрешность измерений составляет приблизительно  $\pm 1$  кг/м<sup>3</sup>. Более высокую точность могут обеспечить усовершенствованные весы, стержень которых выполнен из тонкой иглы (диаметром 0,2—0,3 мм) [147].

Ареометрические весы можно использовать и при высоких температурах. В этом случае весы изготовляют из термоустойчивого материала (например, из графита), а в качестве вспомогательной жидкости применяют жидкое олово, расплавленные соли или высококипящие масла.

### 3-5. ПРУЖИННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

При измерении плотности жидкостей, газов и паров широко применяют пружинные поплаково-весовые плотномеры, которые отличаются простотой конструкции, высокой чувствительностью и точностью измерений. Принципиальная схема пружинного плотномера для газов показана на рис. 3-11. Чувствительным элементом прибора служит легкий поплавок в виде тонкостенного кварцевого шара  $б$ , подвешенного к винтовой спиральной пружине  $з$  из кварцевой нити или вольфрамовой (молибденовой) проволоки. Положение шара указывается стрелкой  $4$ , наблюдаемой при помощи кате-

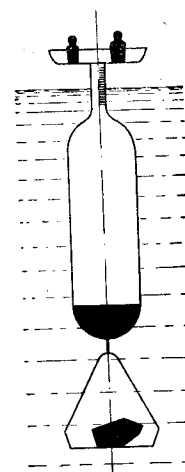


Рис. 3-10. Ареометрические весы.



тометра (микроскопа). Давление газа внутри баллона 5 фиксируется подключенным к нему жидкостным манометром. В зависимости от плотности газа, заполняющего баллон, изменяется выталкивающая сила, пружина деформируется и шар со стрелкой перемещается по вертикали; это перемещение и служит мерой плотности.

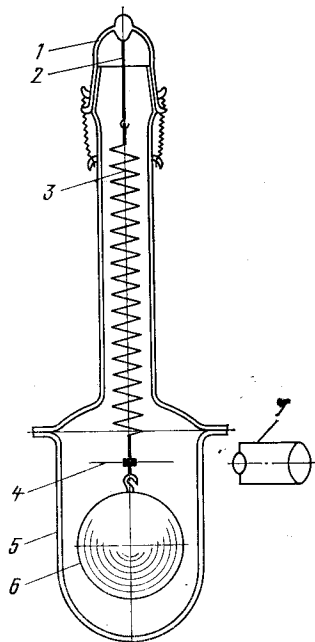
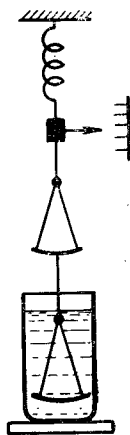


Рис. 3-11. Пружинный поплаво-во-весовой плотномер для газов. 1 — крышка; 2 — проволока; 3 — пружина; 4 — стрелка; 5 — стеклянный баллон; 6 — пустотелый шар; 7 — микроскоп.

Рис. 3-12. Пружинные гидростатические весы для твердых тел.



Если исходное положение шара установлено в вакуумированном баллоне, то в исследуемом газе шар переместится вверх на некоторое расстояние  $L$ , пока не уравниваются упругая сила пружины и выталкивающая сила, тогда искомая плотность

$$\rho = \frac{LC_t}{Vg}, \quad (3-40)$$

где  $V$  — объем шара и пружины;  $C_t$  — жесткость пружины, являющаяся функцией температуры.

Величина  $\frac{dL}{d\rho} = \frac{Vg}{C_t}$  характеризует чувствительность

плотномера. Как видим, она растет с увеличением объема шара и уменьшением жесткости пружины. Так

как жесткость изменяется в зависимости от температуры, то и изменение длины пружины от нагрузки является функцией температуры; кроме того, в противоположном направлении влияет линейное тепловое расширение, которое не зависит от нагрузки. Если коэффициент теплового расширения пружины мал (как, например, у кварца), то влияние изменения жесткости преобладает и длина пружины уменьшается с ростом температуры. Практически эту зависимость устанавливают экспериментально и строят градуировочную кривую  $L_0 = f(t)$ , где  $L_0$  — вызванное нагревом смещение начального положения пружины при нагрузке в вакууме.

Для создания плотномера высокой чувствительности не всегда целесообразно прибегать к высокочувствительным пружинам, так как с ростом их чувствительности снижается допустимая нагрузка, что приводит к уменьшению размеров шара и, следовательно, чувствительности прибора. В результате суммарного эффекта может оказаться, что чувствительность плотномера упадет. Наиболее удобны в работе кварцевые спирали из нитей толщиной 0,1—0,3 мм с диаметром витков 18—20 мм и числом витков 32—40. Оптимальной является жесткость 0,15—0,25 мм/мгс. Этим пружинам соответствуют шары объемом 35—70 см<sup>3</sup> и массой 0,5—1,3 г. Чувствительность таких плотномеров составляет 10 мм·м<sup>3</sup>/кг. Погрешность измерений — до  $\pm 0,05\%$ .

Пружинные плотномеры используют также для измерений плотности газов и паров при высоких температурах (сотни градусов). Расчет и типовые конструкции пружинных весов описаны в работах [9, 62, 131].

Для малого объема газа или пара (примерно 0,5 см<sup>3</sup>) применяют высокочувствительные пружинные весы с ленточной пружиной (например, в виде упругой кварцевой нити), устанавливаемой горизонтально внутри корпуса. Пружина крепится консольно либо непосредственно в боковой стенке корпуса, либо в притертой пробке, вставляемой в отверстие этой стенки. На свободном конце пружины подвешен тонкостенный стеклянный шарик с прикрепленным к нему зеркальцем, с помощью которого через зрительную трубу отсчитывают показания по вертикальной шкале [74].

Простым прибором для измерения плотности твердых тел являются пружинные гидростатические весы (рис. 3-12), которые представляют собой подвешенную

на спиральной пружине двойную чашку, аналогичную показанной на рис. 3-5. Нижняя чашка погружена во вспомогательную жидкость известной плотности. К верхней чашке прикреплен стрелка, которая при деформациях пружины перемещается относительно неподвижной шкалы.

Измерения пружинными весами возможны двумя способами. Работа по первому способу производится точно так же, как и с использованием ареометрических весов (см. § 3-4), и при всех трех взвешиваниях стрелка должна стоять против одной и той же отметки шкалы. Исконную плотность твердого тела подсчитывают по формуле (3-39).

Второй способ заключается в том, что взвешивания заменяют измерением перемещений. Для этого необходимо знать зависимость деформации пружины от нагрузки. Так как обычно измерения ведутся при малых нагрузках (т. е. в области упругих деформаций), можно считать, что растяжение пружины пропорционально нагрузке.

Если удлинение пружины равно  $l_1$  при наложении испытуемого тела на верхнюю чашку весов и  $l_2$  при наложении тела на нижнюю чашку, погруженную в жидкость, то, считая постоянной (во время измерений) температуру  $t$  жидкости и воздуха, получаем следующие уравнения равновесия весов:

$$\left. \begin{aligned} V(\rho_t - D)g &= Cl_1; \\ V(\rho_t - \rho_{ж})g &= Cl_2, \end{aligned} \right\} \quad (3-41)$$

где  $V$  — объем испытуемого тела;  $C$  — жесткость пружины.

Разделив почленно оба уравнения, найдем формулу для определения плотности испытуемого тела:

$$\rho_t = \frac{l_1 \rho_{ж} - l_2 D}{l_1 - l_2}. \quad (3-42)$$

Формула (3-42) выведена при условии, что показание ненагруженных весов равно нулю.

Взвешивание шарового поплавка плотномера можно осуществлять также с помощью электромагнитных сил отталкивания, возникающих при питании переменным током соленоида, внутри которого помещен полый шар из электропроводного немагнитного материала, напри-

мер алюминия [89]. Магнитное поле соленоида, взаимодействуя с магнитным полем возбуждаемых в шаре вихревых токов, с помощью следящей системы удерживает шар подвешенным на определенной высоте независимо от изменений выталкивающей силы. Амплитуда напряжения на выходе фазового детектора, связанного с оптическим или индуктивным датчиком положения шара, является мерой силы тока, необходимого для удерживания шара на заданной высоте, и соответственно плотности газа.

Другая разновидность электромагнитного плотномера основана на использовании шарового поплавка из электропроводного магнитного материала [264], concentрично расположенного в сферической полости камеры с испытуемым газом. Камера выполнена в виде двух полусфер, являющихся неподвижными обкладками двух конденсаторов; общей подвижной обкладкой служит шар. Конденсаторы, питающиеся от источника постоянного напряжения, включены в схему моста, которая питается генератором переменного напряжения. Напряжение разбаланса моста, пропорциональное плотности газа, после усиления используется для возвращения шара в исходное положение путем изменения напряжения на конденсаторах.

Оригинальный поплавково-весовой плотномер для измерения плотности газов под давлением, в том числе при низких температурах, описан в [56]. Подвесное устройство, помещенное в газовую среду и реагирующее на изменение ее плотности, состоит из удлиненного кварцевого поплавка и подвешенного к нему на тонкой проволоке железного сердечника. Электромагнитная катушка, охватывающая сердечник, связана с чашкой аналитических весов. При пропускании тока через катушку образующееся магнитное поле стягивает сердечник, вес которого зависит от выталкивающей силы, действующей на подвесное устройство, т. е. от плотности газовой среды. Электронная следящая система регулирует напряженность магнитного поля катушки в зависимости от положения сердечника в ней.

При весьма высоких и низких температурах, а также при высоких давлениях хорошие результаты дают тензорезисторные поплавково-весовые плотномеры [20, 93, 163].

### 3-6. ФЛОТАЦИОННЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

Флотационный метод измерения плотности жидкости состоит в том, что поплавок, погруженный в жидкость, приводят во взвешенное состояние (флотационное равновесие), когда он не всплывает и не тонет. Равновесному состоянию соответствует равенство плотностей поплавка и жидкости; определив плотность поплавка, соответствующую температуре флотационного равновесия,

тем самым находят и плотность жидкости при этой температуре, после чего легко вычислить плотность при требуемой температуре.

К числу первых исследователей, описавших флотационный метод, относится Д. И. Менделеев, предложивший применить для измерения плотности воды полностью погруженный поплавков в виде полого геометрически правильного шара и добиться его безразличного равновесия в воде при помощи тары, вводимой внутрь шара [87].

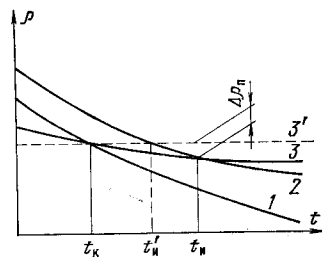


Рис. 3-13. К пояснению принципа измерения термофлотационным плотномером.

Достоинствами флотационного метода являются универсальность (пригодность для жидкостей с самыми различными свойствами), независимость точности от поверхностного натяжения жидкости, возможность измерений в замкнутой системе.

Простейшие флотационные плотномеры представляют собой сосуд, в котором находятся поплавки различной плотности [171, 217]. Испытуемую жидкость засасывают в сосуд при помощи резиновой груши, и о плотности жидкости судят по всплывшим поплавкам.

Безразличное равновесие поплавок с плотностью, незначительно отличающейся от плотности жидкости, можно создать различными способами. Один из способов основан на постепенном изменении температуры жидкости, что и обеспечивает требуемый эффект благодаря существенно большему коэффициенту теплового расширения у жидкости, чем у поплавок. Установлено, что поплавок может реагировать на изменения температуры около  $0,001^{\circ}\text{C}$ . Чем больше плотность жидкости, тем более высокая температура требуется для достижения взвешенного состояния поплавок. Положение и движение поплавок контролируют при помощи катетометра или зрительной трубы.

Принцип измерения иллюстрируется рис. 3-13, где показаны типовые графики изменения плотности поплавок (кривая 3), испытываемой жидкости (2) и контрольной жидкости известной плотности (1) в зависимости от тем-

пературы. Точки пересечения кривой 3 с кривыми 1 и 2 характеризуют флотационное равновесие поплавок соответственно в контрольной (температура  $t_k$ ) и испытываемой (температура  $t_n$ ) жидкостях, причем  $t_n > t_k$ .

Из рис. 3-13 видно, что плотность испытываемой жидкости при температуре флотационного равновесия  $(\rho_n)_{t_n}$  меньше плотности контрольной жидкости при температуре флотационного равновесия  $(\rho_k)_{t_k}$  на величину  $\Delta\rho_n$ , обусловленную тепловым расширением поплавок, причем на основании выражения (В-7) имеем:

$$\Delta\rho_n = (\rho_n)_{t_k} - (\rho_n)_{t_n} = \beta(t_n - t_k)(\rho_n)_{t_k}, \quad (3-43)$$

где  $\rho_n$ ,  $\beta$  — плотность и коэффициент объемного расширения поплавок.

С другой стороны, для флотационного равновесия можно записать  $(\rho_n)_{t_k} = (\rho_k)_{t_k}$  и  $(\rho_n)_{t_n} = (\rho_n)_{t_n}$ , тогда из (3-43) получаем:

$$(\rho_n)_{t_n} = (\rho_k)_{t_k} [1 - \beta(t_n - t_k)]. \quad (3-44)$$

Таким образом, измерения сводятся к последовательному определению температур флотационного равновесия в обеих жидкостях. Значения  $(\rho_k)_{t_k}$  и  $\beta$  находят по справочникам. Если же коэффициент теплового расширения поплавок неизвестен, то его можно вычислить из выражения (3-44), предварительно определив температуры флотационного равновесия поплавок в двух жидкостях с известной плотностью.

Точность измерений зависит от конструкции и материала поплавок. Материал, из которого изготовлен поплавок, должен быть устойчивым к длительному воздействию испытываемой жидкости и обладать малым коэффициентом теплового расширения. С этой точки зрения пригоден плавленый кварц, обладающий ничтожным коэффициентом теплового расширения (см. табл. В-2), что позволяет в большинстве случаев, учитывая небольшую разность температур флотационного равновесия в испытываемой и контрольной жидкостях, считать плотность поплавок постоянной (пунктирная прямая 3' на рис. 3-13); соответственно вместо  $t_n$  будет  $t'_n$ . Тогда искомая плотность равна плотности контрольной жидкости при температуре флотационного равновесия.

Существуют различные конструкции поплавков. Наиболее быстро и правильно реагирует на небольшие изменения плотности жидкости поплавок в форме тонкого цилиндра (длина около 75 мм, диаметр 4 мм). Поплавок снабжен кольцом для манипулирования им при помощи стеклянной палочки с крючком. Хорошие результаты дает также поплавок в виде полого шарика диаметром 10 мм с двумя соосными тонкими отростками длиной 5 и 30 мм. Для очень малых количеств жидкости (примерно  $0,05 \text{ см}^3$ ) применяют микропоплавки (например, длиной 10—20 мм и диаметром 1—2 мм) [63]. Массу поплавок подгоняют так, чтобы он находился во взвешенном состоянии в контрольной жидкости приблизительно при нормальной температуре.

При измерениях сосудов с жидкостью помещают в термостат, обеспечивающий постоянство температуры с погрешностью  $\pm 0,001^\circ\text{C}$  [63]. Температуру обычно измеряют платиновым термометром сопротивления, что позволяет заметить изменение температуры  $0,0003^\circ\text{C}$ .

Погрешность измерений флотационным методом при соблюдении комплекса мер предосторожности может быть доведена до  $\pm 0,0001\%$ .

Непосредственное наблюдение за температурой с целью фиксации момента наступления флотационного равновесия — это длительный и трудоемкий процесс. Для упрощения этой процедуры можно пользоваться графическим методом, исходя из того, что при малых интервалах температур скорость перемещения поплавка, которая практически постоянна при данной температуре, линейно связана с отклонением этой температуры от температуры флотационного равновесия. Таким образом, откладывая по одной оси координат несколько значений температуры выше и ниже температуры флотационного равновесия, а по другой — соответствующие скорости перемещения (погружения и всплытия) поплавка, проводят прямую линию через экспериментальные точки и на пересечении этой линии с соответствующей осью находят температуру при нулевой скорости, т. е. температуру, при которой наблюдается флотационное равновесие.

При пользовании флотационным методом необходимо учитывать влияние давления (атмосферного и столба жидкости над поплавком) на температуру флотационного равновесия. Это влияние определяется двумя противоположно направленными эффектами — сжимаемостью жидкости и изменением объема поплавка. При повышении

давления плотность жидкости растет и, следовательно, температура флотационного равновесия повышается; одновременно уменьшается объем поплавка, что приводит к понижению температуры флотационного равновесия (см. рис. 3-13). Соответствующую общую поправку определяют экспериментально.

Зависимость скорости движения поплавка и температуры флотационного равновесия от давления может быть использована для измерения плотности. Поддерживая постоянной температуру, определяют плотность жидкости относительно контрольной жидкости путем сравнения давлений, при которых поплавок находится в состоянии безразличного равновесия в каждой из жидкостей. В этом случае целесообразно использовать тонкостенный полый поплавок (например, из кварца), чувствительный к давлению [182]. Давление создают нагнетанием воздуха поверх жидкости или сжатием жидкости при помощи грузогоршнечного устройства. Для измерения давления, соответствующего флотационному равновесию, используют точный жидкостный манометр с зеркальной шкалой.

Недостатки этого способа создания флотационного равновесия связаны с тем, что, во-первых, изменение давления приводит к изменению растворимости газа (воздуха) в жидкостях и, во-вторых, необходимо знать точные значения коэффициента изотермической сжимаемости жидкостей.

Состояния безразличного равновесия поплавка можно добиться также при помощи электромагнитной силы соленоида, действующей на помещенный в его магнитном поле ферромагнитный сердечник, который вертикально встроен в стеклянный или пластмассовый поплавок [191, 219]. Соленоид располагают под сосудом с жидкостью, над ним или коаксиально снаружи. Электромагнитная сила, пропорциональная силе тока в соленоиде, компенсирует разность веса поплавка и выталкивающей силы. Уравнение равновесия поплавка имеет вид:

$$\pm Mg \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_n} \right) = ki, \quad (3-45)$$

где  $M$ ,  $\rho_n$  — масса и плотность поплавка;  $\rho$  — плотность жидкости;  $i$  — сила тока при равновесии поплавка;  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от числа витков соленоида.

В левой части уравнения (3-45), а также в последующих уравнениях знак плюс соответствует случаю, когда  $\rho_n > \rho$ , а минус — когда  $\rho_n < \rho$ .

Коэффициент  $k$  определяют при градуировке прибора в двух жидкостях с известной плотностью  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Если соответствующие значения силы тока обозначить

$i_1$  и  $i_2$ , то, записав для них два уравнения (3-45) и вычтя одно из другого, получим:

$$k = \frac{\pm Mg(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_{\text{ж}}(i_1 - i_2)}.$$

Искомую плотность жидкости вычисляют по уравнению (3-45), преобразованному к виду

$$\rho = \rho_{\text{ж}} \mp Ci, \quad (3-46)$$

где  $C = k\rho_{\text{ж}}/Mg$  — константа прибора.

Так как функция  $\rho = f(i)$  линейная, то градуировочную характеристику строят по двум указанным выше значениям  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Силу тока измеряют миллиамперметром. Погрешность измерений плотности составляет приблизительно  $\pm 0,3\%$ , если колебания температуры поддерживать в пределах  $\pm 0,02^\circ\text{C}$ , но может быть значительно снижена при более точном термостатировании; например, термостатирование с погрешностью  $\pm 0,001^\circ\text{C}$  позволяет снизить погрешность измерений до  $\pm 0,001\%$  [219], а с погрешностью  $\pm 0,0002^\circ\text{C}$  — до  $\pm 0,0001\%$  [205].

Как вытекает из выражения (3-45), чувствительность прибора  $di/d\rho = Vg/k$  (где  $V = M/\rho_{\text{ж}}$  — объем поплавка) тем выше, чем больше отношение  $V/k$ ; для данного поплавка необходимо уменьшать  $k$ , т. е. число витков соленоида. Однако одновременно с увеличением чувствительности уменьшается диапазон измерений; для его расширения предусматривают сменные кольцевые грузики из платиновой проволоки, надеваемые на поплавок.

Для уменьшения трудоемкости и повышения точности измерений целесообразно вместо установления момента флотационного равновесия измерять скорость медленно всплывающего поплавка, пользуясь шкалой в окуляре микроскопа. При малой напряженности магнитного поля эта скорость пропорциональна действующей на поплавок силе; коэффициент пропорциональности определяют при градуировке, помещая на поплавок различные грузы и фиксируя значения силы тока в соленоиде, необходимой для приблизительного достижения флотационного состояния. Полученную экспериментально прямую линию экстраполируют до точки, в которой скорость равна нулю.

Описанный выше принцип позволяет измерять плотность жидкостей и при высоких давлениях [200]. В этом случае жидкость заключена в толстостенный сосуд, снабженный соосными оптическими окнами для наблюдения за положением поплавка. При пользовании таким прибором необходимо учитывать сжимаемость поплавка и градуировочной жидкости.

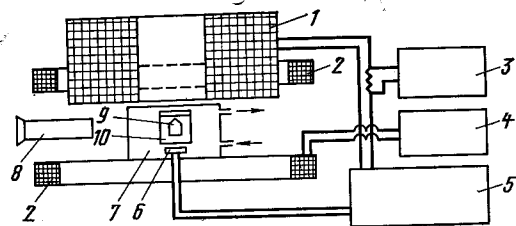


Рис. 3-14. Магнитно-поплавковый флотационный плотномер.

1 — соленоид; 2 — катушка Гельмгольца; 3 — потенциометр; 4 — источник питания; 5 — схема регулирования; 6 — приемная катушка; 7 — термостат; 8 — микроскоп; 9 — поплавок с магнитом; 10 — кювета с жидкостью.

Перспективным направлением развития магнитно-поплавкового флотационного метода является применение электронных следящих систем, обеспечивающих автоматическое поддержание поплавка на требуемой высоте [37, 173, 177, 202, 210, 213, 219]. Неподвижность поплавка относительно кюветы устраняет влияние вязкости жидкости и стенок кюветы, а также позволяет использовать очень малый объем жидкости. В одной из таких схем (рис. 3-14) миниатюрный цилиндрический поплавок 9 массой 0,04 г магнитно подвешен в герметично закрытой прозрачной кювете 10 и полностью погружен в испытуемую жидкость в количестве  $0,2 \text{ см}^3$  [177]. Сигнал от приемной катушки 6 поступает в схему регулирования 5, которая управляет током соленоида 1 так, что поплавок поддерживается на заданной высоте, определяемой нанесенной на нем круговой меткой. Эта метка используется и при градуировке прибора путем измерения силы тока в соленоиде, когда поплавок подвешен на заданной высоте в жидкости с известной плотностью.

Соленоид состоит из трех катушек, установленных одна над другой и содержащих 40 000 витков эмалированного медного провода диаметром 0,45 мм с полным

сопротивлением 2200 Ом. Размеры соленоида: внутренний диаметр 38 мм, наружный диаметр 230 мм, высота 100 мм. Катушки разделены латунными пластинами, охлаждаемыми циркулирующей жидкостью.

Аналогичная схема используется для измерений при низких температурах (90—300 К) и давлении до 50 кгс/см<sup>2</sup> (5 МПа) с погрешностью  $\pm 0,1\%$  [213].

В тех случаях, когда визуально наблюдать за поплавкой не представляется возможным, положение поплавка определяют при помощи схемы с дифференциальным трансформатором [207]. На первичную обмотку этого трансформатора подается внутренний опорный сигнал синхронного усилителя. Вторичная обмотка разделена на две половины, компенсация которых осуществляется конденсатором и потенциометром, а разностный сигнал поступает на синхронный усилитель. С выхода усилителя сигнал подается в систему автоматического регулирования, а затем на усилитель мощности, управляющий током соленоида. Система стремится уменьшить сигнал рассогласования вторичной обмотки трансформатора и, таким образом, удерживает поплавок точно между половинами вторичной обмотки.

Тот же эффект достигается при использовании оптического устройства: от лампочки, расположенной вне термостата, с помощью световода луч света направляется через нижнюю часть кюветы с испытуемой жидкостью (под поплавкой) и воспринимается фотоэлементом, выходной сигнал которого после усиления подается в соленоид [205].

Как видно из изложенного ранее, существенным преимуществом магнитно-поплавкового флотационного метода является возможность измерений с высокой точностью весьма малых количеств жидкости (начиная от долей кубического сантиметра), находящейся в замкнутом объеме, в частности, при высоком давлении, а также при высоких и низких температурах.

Магнитно-поплавковый метод рассчитан на работу с маловязкими жидкостями. Если же испытуемая жидкость вязкая, то ее помещают в специальную полость внутри поплавка с магнитом, а сосуд заполняют жидкостью с известной плотностью [55] и измерения выполняют, как описано выше при магнитно-поплавковом методе.

К рассмотренной группе приборов тесно примыкает установка, в которой регистрация состояния безразличного равновесия одного из нескольких сферических поплавков в сосуде высокого давления осуществляется при помощи индуктивного датчика. Поплавок выполнен из кварца и снабжен металлическим грузом, который при перемещении в поле катушки изменяет ее индуктивность

и соответственно частоту LC-генератора, в контур которого включена катушка [104]. Такая установка позволяет измерять плотность неэлектропроводных жидкостей в широком диапазоне температур (180—570 К) при давлении до 600 кгс/см<sup>2</sup> (60 МПа).

Хорошие результаты обеспечивает комбинация магнитно-поплавкового метода с гидростатическим взвешиванием, сочетающая в себе достоинства обоих методов [37, 210, 211].

Герметичная кювета (рис. 3-15) подвешена на тонкой немагнитной проволоке к одному плечу аналитических весов. Приемная катушка смонтирована на достаточном расстоянии от дна кюветы и не влияет на ее массу. Для определения плотности жидкости производят два взвешивания кюветы с жидкостью и поплавком: первое — при отключенном соленоиде и второе — при включенной системе магнитной подвески поплавка. Если обозначить массы уравновешивающих гирь соответственно  $m_1$  и  $m_2$ , то можно написать уравнения равновесия весов

$$m_k + M - V_k D = m_1 (1 - D_{от});$$

$$m_k + V\rho = m_2 (1 - D_{от}),$$

где  $M$ ,  $V$  — масса и объем поплавка;  $m_k$ ,  $V_k$  — масса и объем кюветы с жидкостью и проволокой. Член  $V\rho$  во втором уравнении характеризует действующую на весы реакцию со стороны поплавка, которая равна и противоположно направлена выталкивающей силе.

Совместное решение уравнений дает выражение для искомой плотности жидкости

$$\rho = \frac{M + (m_2 - m_1)(1 - D_{от})}{V}. \quad (3.47)$$

Если масса и объем поплавка неизвестны, то их можно определить тем же прибором, произведя последователь-

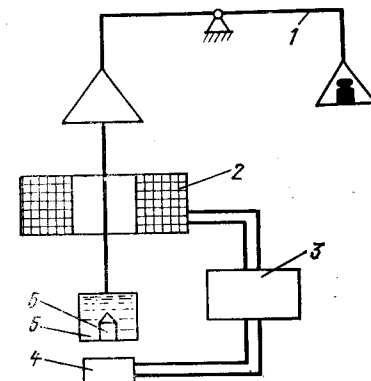


Рис. 3-15. Магнитно-поплавковый флотационный плотномер с весами.

1 — весы; 2 — соленоид; 3 — схема регулирования; 4 — приемная катушка; 5 — кювета с жидкостью; 6 — поплавок с магнитом.

но четыре взвешивания: пустой кюветы, кюветы с поплавком, кюветы с поплавком и дистиллированной водой при выключенной и включенной магнитной подвеске. Первые два взвешивания позволяют найти массу поплавка, а вторые два — объем, который определяют из формулы (3-47), куда подставляют табличное значение плотности воды с учетом температуры и давления.

Легко заметить, что схема магнитной подвески, изображенная на рис. 3-15, гораздо проще схемы, данной на рис. 3-14, так как не требуется измерять ток соленоида и можно использовать значительно меньший соленоид, если после выключения тока сердечник полностью размагничивается. Соответственно повышается и точность измерений. Например, в диапазоне температур от 20 до 330°C и давлений до 7 кгс/см<sup>2</sup> (0,7 МПа) погрешность измерений составляет ±0,005% при объеме жидкости 6—12 см<sup>3</sup> и погрешности термостатирования ±0,01°C [210, 211].

Модификацией схемы, показанной на рис. 3-15, является прибор, у которого соленоид подвешен к чашке весов. Внутри соленоида находится ферромагнитный сердечник, соединенный снизу тонкой манганиновой или платиновой проволокой с поплавком [37, 208]. Этот прибор особенно удобен для работы с высокими давлениями при различных температурах ниже и выше 0°C [1, 3, 45]. Поплавок, проволока и сердечник помещены в герметичный вертикальный сосуд высокого давления, имеющий вытянутую форму. Сосуд состоит из трех частей — поплавковой камеры, верхней головки и соединительной трубки, которые выполнены из немагнитных материалов. В головке размещены сердечник и приемная катушка, концы которой выведены наружу через уплотнение. Поплавковая камера заключена в термостат или криостат. Приемная катушка и соленоид подключены к электронной следящей системе, которая обеспечивает неизменное положение сердечника относительно соленоида.

После того как в сосуде созданы необходимые давление и температура, соленоид взвешивают сначала при выключенном токе, а затем при включенном, т. е. вместе с подвесной системой. Искомую плотность рассчитывают по формуле [1, 37]

$$\rho_{t, p} = \frac{M - (m_2 - m_1) - \rho_c (V_c + 0,5V_n)}{V_n k_1 k_2 + 0,5V_n} \quad (3-48)$$

где  $M$  — масса подвесной системы;  $m_1$  — масса соленоида;  $m_2$  — масса соленоида с подвесной системой, погруженной в жидкость;  $\rho_c$  — плотность жидкости в зоне сердечника;  $V_c$ ,  $V_n$ ,  $V_n$  — объемы сердечника, нити и поплавка;  $k_1$ ,  $k_2$  — поправочные множители, учитывающие тепловое расширение и изотермическую сжимаемость поплавка.

Значения  $M$ ,  $V_c$ ,  $V_n$ ,  $V_n$  определяют (при градуировке прибора) методом гидростатического взвешивания (см. § 3-1 и 3-2).

Представляет интерес дальнейшее развитие описанного прибора с заменой рычажных весов электромагнитными, причем последние схемно объединены с соленоидом, осуществляющим магнитную подвеску сердечника [56, 208]. Такой прибор позволяет работать с очень высокими давлениями — до 2000 кгс/см<sup>2</sup> (200 МПа).

Для измерения плотности очень малого количества жидкости (начиная приблизительно от 1 мм<sup>3</sup>) применяют разновидность флотационного метода: поплавком служит капля испытуемой жидкости, введенная в не смешивающуюся с ней и не растворяющую ее контрольную жидкость. Плотность последней подбирают так, чтобы она была равна плотности капли. В качестве контрольной жидкости в зависимости от свойств испытуемой жидкости применяют, например, смесь четыреххлористого углерода с толуолом, вазелиновое масло, водные растворы этилового спирта или минеральных солей и др. Соотношение компонентов смеси при непрерывном ее перемешивании постепенно регулируют до тех пор, пока не наступит состояние безразличного равновесия капель, выдавленных из пипетки с испытуемой жидкостью. Затем тем или иным методом измеряют плотность полученной смеси.

Безразличного равновесия капли можно добиться также изменением температуры жидкости аналогично тому, как это делают во флотационном плотномере. Для определения плотности необходимо знать коэффициенты теплового расширения обеих жидкостей.

Более точные результаты обеспечивает способ, основанный на применении контрольной жидкости, плотность которой линейно изменяется по высоте столба. Для этого в термостатированном стеклянном цилиндре диаметром 10—20 мм и высотой 200—400 мм образуют смесь двух специально подобранных жидкостей с различной плотностью (например, бромбензола и керосина или четыреххлористого углерода и толуола), вливая более легкую смесь поверх более тяжелой; после длительной выдержки в результате диффузии может быть получен линейный градиент плотности в пределах ±1% × 10<sup>-6</sup> г/см<sup>3</sup>.

Введенная в цилиндр капля исследуемой жидкости, опускаясь вдоль столба смеси, останавливается в том месте, где плотности смеси и капли равны. Положение капли фиксируют при помощи катетометра и искомую плотность определяют по градуировочной кривой. Кривую строят путем определения положений, которые в той же смеси занимают капли жидкостей или твердые частицы с известной плотностью.

Погрешность капельно-флотационного плотномера при тщательном проведении измерений может быть доведена до  $\pm 0,005\%$ . Именно этим прибором пользовались, например, при исследовании свойств аномальной воды [43].

Флотационный метод измерения плотности твердых тел аналогичен флотационному методу измерения плотности жидкостей, но является как бы его зеркальным отображением, т. е. известна плотность рабочей жидкости, и по ней определяют плотность твердого тела, находящегося во взвешенном состоянии в этой жидкости. Область применения флотационного метода, таким образом, ограничена возможностью приготовления тяжелых жидкостей (их плотность не превышает приблизительно  $5000 \text{ кг/м}^3$ ).

Существенные достоинства флотационного метода состоят в том, что он позволяет измерять плотность твердых частиц весьма малых размеров (в частности, порошков) и обладает высокой чувствительностью.

Разновидности флотационного метода различаются способом и точностью достижения взвешенного состояния испытуемого тела. Наибольшее распространение получили два способа приведения твердого тела во флотационное состояние: добавлением жидкости другой плотности или изменением температуры жидкости.

В качестве флотационных жидкостей применяют различные жидкости (в том числе так называемые тяжелые), которые не взаимодействуют с испытуемым телом, не растворяют его, обладают малой упругостью паров и хорошей смачивающей способностью. Среди этих жидкостей можно назвать, в частности, хлористый кальций ( $\rho_{20}=1350 \text{ кг/м}^3$ ), хлористый цинк ( $1800 \text{ кг/м}^3$ ), бромформ ( $2891 \text{ кг/м}^3$ ), тетрабромэтан ( $2960 \text{ кг/м}^3$ ), М-45 ( $3000 \text{ кг/м}^3$ ), жидкость Туле ( $3196 \text{ кг/м}^3$ ), иодистый метилен ( $3325 \text{ кг/м}^3$ ), жидкость Рорбаха

( $3580 \text{ кг/м}^3$ ), жидкость Клеричи<sup>1</sup> ( $4270 \text{ кг/м}^3$ ) и др. [64, 69]. Для приготовления набора жидкостей разных плотностей используют либо однокомпонентные жидкости, либо их смеси с разбавителями, в качестве которых служат бензол, толуол, этиловый спирт, четыреххлористый углерод, ксилол, вода и др. Расчет соотношения объемов жидкостей (концентрированной и разбавителя) для получения жидкости с требуемой плотностью выполняют по уравнению (1-25).

Указанными выше жидкостями можно пользоваться и при измерении плотности твердых тел, которые тонут в этих жидкостях. С этой целью к телу подвешивают поплавков, выполненный в том или ином виде (например, в виде подковы, крючка, петли) из материала с малой плотностью (стекла, алюминия, пластмассы и т. д.), устойчивого к воздействию данной жидкости и обладающего достаточной прочностью. Предварительно измеряют значения массы поплавка  $m_{п}$  и испытуемого тела  $m_{т}$ . После уравнивания тела с поплавком в жидкости находят ее плотность  $\rho_{ж}$ , которая равна плотности тела с поплавком, тогда искомую плотность тела вычисляют из соотношения

$$\rho = \frac{\rho_{ж}}{1 - m_{п}(\rho_{ж} - \rho_{п})/m_{т}\rho_{п}}, \quad (3-49)$$

где  $\rho_{п}$  — плотность материала поплавка.

Точность измерений при использовании дополнительного поплавка зависит от точности взвешивания тела и поплавка, а также от точности измерения плотности поплавка и жидкости. Как видно из выражения (3-49), массу испытуемого тела следует брать максимально возможной, а поплавок — минимальной (т. е. стремиться к наименьшему значению отношения  $m_{п}/m_{т}$ ) в тех пределах, которые допускает рассматриваемый метод. Чем больше плотность тела, тем крупнее должен быть поплавок для создания флотационного равновесия, но это увеличивает погрешность измерения плотности тела.

Таким образом, добившись тем или иным способом состояния безразличного равновесия тела в жидкости и зная температуру флотации, легко установить плотность жидкости, а следовательно, и плотность тела при этой

<sup>1</sup> Упариванием при температуре  $80^\circ\text{C}$  можно добиться увеличения плотности до  $5100 \text{ кг/м}^3$ .



температуре. Для пересчета плотности к требуемой температуре достаточно знать коэффициент теплового расширения тела.

Установление флотационного равновесия тела путем изменения температуры жидкости и наблюдения в микроскоп за движением тела представляет собой довольно трудоемкий длительный процесс. Поэтому при массовых измерениях для сокращения длительности процесса применяют интерполяционный способ нахождения

температуры флотации, состоящий в том, что определяют зависимость скорости перемещения тела от температуры и затем интерполяцией находят температуру, соответствующую нулевой скорости [69]. Этот способ основан на том, что в небольшом интервале температур скорость движения тела в жидкости изменяется по линейному закону в зависимости от разности между температурой жидкости и температурой флотации.

Измерения проводят следующим образом. Испытуемое тело опускают в специальный цилиндр, заполненный жидкостью, которая подобрана так, что ее плотность при комнатной температуре несколько больше, чем у тела. Цилиндр высотой около 400 мм имеет двойные стенки, полость между которыми омывается водой из термостата, и снабжен притертой пробкой. В результате медленного нагревания цилиндра плотность жидкости уменьшается и тело начи-

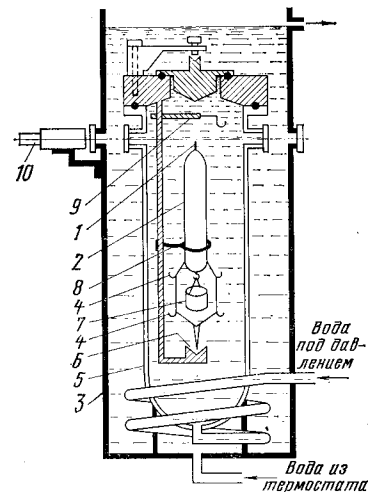


Рис. 3-16. Поплавковый флотационный плотномер с переменным давлением.

1 — наблюдаемая верхняя поплавок; 2 — поплавок; 3 — корпус; 4 — крючки для грузов; 5 — измерительная камера; 6 — установочный конус; 7 — корзинка для испытуемого тела; 8 — верхний упор; 9 — нагрузочное устройство; 10 — окуляр с визирной сеткой.

нает тонуть. Фиксируя секундомером моменты прохождения телом известного расстояния между двумя рисками по высоте цилиндра, определяют скорость падения тела, соответствующую данной температуре. Ту же процедуру повторяют при охлаждении цилиндра и перемещении тела вверх. Измерения выполняют при нескольких значениях температуры; для каждого из них на графике проводят прямую линию через две точки, полученные при движении вниз и вверх, и в точке пересечения прямой с осью температур находят температуру флотации при нулевой скорости движения. В расчет принимают среднее значение температуры флотации. Описанный способ интерполяции позволяет определять температуру флотации с погрешностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , т. е. измерять плотность твердых тел с погрешностью  $\pm 1 \text{ кг/м}^3$ , если плотность жидкости известна с погрешностью  $\pm 0,5 \text{ кг/м}^3$ .

Флотационного равновесия можно добиться также изменением давления при постоянной температуре. Одна из реализаций плотномера подобного типа показана на рис. 3-16 [181]. Испытуемое тело помещают в корзинку 7, подвешенную к тонкостенному полуму поплавок 2 из кварца, который находится в герметизированной измерительной камере 5. Камера заполнена водой под давлением. Масса поплавок около 5 г, объем  $10 \text{ см}^3$ . Благодаря тонкой стенке поплавок очень чувствителен к изменению давления, причем его сжимаемость больше сжимаемости воды.

Поплавок с телом нагружают дополнительными грузами так, чтобы он медленно погружался в воде при требуемой температуре, и затем несколько уменьшают давление в системе. В результате увеличения объема и, следовательно, выталкивающей силы поплавок начинает всплывать и благодаря наличию градиента давления столба воды попадает в зону с пониженным давлением. Это вызывает дополнительное расширение поплавок и увеличение выталкивающей силы, поэтому движение поплавок вверх происходит с ускорением. При увеличении давления поплавок сжимается, выталкивающая сила уменьшается, и он погружается глубже — в зону повышенного давления и ускоренно движется вниз.

Таким образом, из-за градиента давления столба жидкости движение поплавок в обоих направлениях происходит с ускорением и состояние устойчивого равновесия наступить не может, несмотря на то, что существует давление, при котором средняя плотность поплавок становится равной плотности вытесненной воды. Это давление равновесия может быть получено как среднее из двух значений давления, при которых поплавок, двигаясь соответственно вверх и вниз, проходит за одно и то же время одинаковое расстояние вверх и вниз от начального уровня отсчета глубины погружения. За движением поплавок наблюдают через микроскоп 10, систему окон и зеркал. Равновесное давление можно найти также графическим способом, определив на графике «скорость движения поплавок — давление» точку пересечения прямой с осью давлений.

Плотномер градуируют при помощи двух образцов, массы и объемы которых известны. Для поплавок, нагруженного последовательно этими образцами, определяют равновесные давления, которые затем в сочетании

с равновесным давлением для поплавка с испытуемым телом позволяют вычислить искомую плотность тела. Прибор позволяет измерять плотность весьма малых твердых частиц с погрешностью примерно  $\pm 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>. Он дает особенно хорошие результаты при измерении малых изменений плотности твердых веществ.

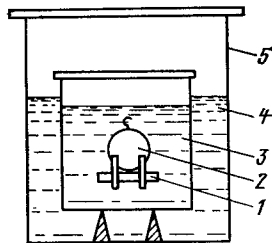


Рис. 3-17. Поплавковый флотационный плотномер с растворяющимся испытуемым телом.

На рис. 3-17 представлена схема другой разновидности поплавкового флотационного плотномера, в котором температура жидкости остается постоянной, а флотационное равновесие достигается изменением массы испытуемого тела за счет его частичного растворения в той же жидкости [97]. Поплавок, представляющий собой пустотелый кварцевый шар 2, и прикрепленную к нему кварцевую корзинку 1 с испытуемым телом погружают на дно сосуда 3 со слабым растворителем. Сосуд находится в жидкости 4 термостата 5. По мере растворения тела поплавок медленно всплывает. Когда он дойдет до фиксированного уровня, тело удаляют из корзинки, высушивают и взвешивают. Из уравнения равновесия всплывшего поплавка легко получить выражение для плотности тела

$$\rho = \frac{m\rho_{ж}}{M + m - V\rho_{ж}}, \quad (3-50)$$

где  $M$ ,  $V$  — масса и объем поплавка;  $m$  — масса тела;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости.

Флотационное равновесие испытуемого тела можно создать так же при помощи магнитного поля [160]. К электропроводной жидкости, в которую погружено тело, подводят ток и накладывают на нее магнитное поле. В зависимости от направления электромагнитных объемных сил, возникающих в скрещенных электрическом и магнитном полях, жидкость приобретает кажущуюся плотность, которая больше или меньше по сравнению с ее физической плотностью. Меняя ток и магнитную индукцию, подбирают такое значение кажущей-

ся плотности жидкости, при котором тело займет в ней положение безразличного равновесия. В этот момент фиксируют показания электроизмерительных приборов, и искомую плотность  $\rho_{каж}$  определяют по формуле

$$\rho_{каж} = \rho_{ж} + \frac{jB}{g},$$

где  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости;  $j$  — плотность тока;  $B$  — магнитная индукция.

### 3-7. ГРАДИЕНТНЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

К флотационным плотномерам относятся также приборы, в которых испытуемое тело находится в устойчивом равновесии на определенном уровне в столбе жидкости с вертикальным градиентом плотности, которая увеличивается сверху вниз. Условимся такие плотномеры называть градиентными. Принцип действия градиентного плотномера иллюстрируется схемой на рис. 3-18, где показан вертикальный столб жидкости с градиентом плотности от  $\rho_1$  вверху до  $\rho_2$  внизу, причем  $\rho_2 > \rho_1$ . Помещенная в жидкость твердая частица с плотностью  $\rho_1 < \rho_x < \rho_2$  двинется вверх или вниз (в зависимости от ее исходного положения) до тех пор, пока не достигнет того уровня, на котором плотность жидкости  $\rho_0 = \rho_x$ , т. е. частица займет положение устойчивого равновесия.

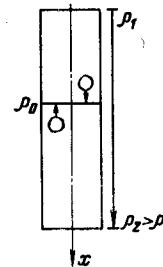


Рис. 3-18. Движение твердой частицы к равновесному положению.

Известно несколько способов создания градиента плотности в столбе жидкости. Один из них основан на взаимной диффузии двух жидкостей разной плотности: линейный градиент плотности образуется за счет градиента концентрации одной из жидкостей [187]. К недостаткам этого способа относятся длительное время установления градиента и необходимость построения градуировочной кривой распределения плотности жидкости при каждом измерении. Способ концентрационного градиента менее удобен и точен, чем другие варианты флотационного метода. Однако он находит применение и в современных исследованиях; так, например, в [262] градиент успешно создавали при помощи рас-

творов триэтилфосфата и тетрабромэтана с плотностью соответственно 2500 и 2600 кг/м<sup>3</sup>. При градиенте плотности 0,1 кг/м<sup>3</sup> на 1 мм и погрешности измерения положения тела ±1 мм погрешность измерения плотности составила ±0,1 кг/м<sup>3</sup>.

Требуемый постоянный градиент плотности жидкости можно образовать проще, точнее и надежнее при помощи соответствующего градиента температуры вдоль столба однородной жидкости. Этот градиент осуществляется автоматически в теплоизолированном вертикальном цилиндре с жидкостью, если на его концах искусственно поддерживать постоянные, но разные значения температуры (вверху больше, чем внизу). После достижения теплового равновесия вдоль цилиндра устанавливается постоянный градиент плотности. Помещенное в жидкость твердое тело движется вверх или вниз (в зависимости от плотности) до наступления равновесного положения, соответствующего тому уровню в жидкости, где ее плотность равна искомой плотности тела.

Расположив ось абсцисс по вертикали (рис. 3-18), можно в следующем виде записать уравнение движения тела в жидкости [257]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + mk \frac{dx}{dt} - F(x) = 0, \quad (3-51)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} F &= gV(\rho - \rho_{ж}); \\ \rho &= \rho_n [1 - \beta(T - T_n)]; \\ \rho_{ж} &= \rho_{ж,n} [1 - \beta_{ж}(T - T_n)]; \\ V &= V_n [1 + \beta(T - T_n)], \end{aligned} \right\} \quad (3-52)$$

где  $\beta$  и  $\beta_{ж}$  — коэффициент объемного расширения соответственно тела и жидкости;  $\rho$ ,  $\rho_{ж}$  — плотность соответственно тела и жидкости при температуре  $T$ ;  $V$  — объем тела при температуре  $T$  (индексом «н» обозначены те же величины при нормальной температуре);  $k$  — константа с размерностью  $t^{-1}$ , зависящая, в частности, от вязкости жидкости и формы тела.

Уравнения (3-51) и (3-52) не учитывают градиента плотности, обусловленного гидростатическим давлением столба жидкости, и его необходимо принимать во внимание в качестве поправки при расчетах.

После подстановки величин  $\rho$ ,  $\rho_{ж}$  и  $V$  уравнение (3-51) принимает вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + Bx - A = 0, \quad (3-53)$$

причем

$$B = \frac{\rho_{ж,n}}{\rho_n} g(\beta_{ж} - \beta) \Delta T;$$

$$A = \left\{ 1 - \frac{\rho_{ж,n}}{\rho_n} [1 + (\beta - \beta_{ж})(T_0 - T_n)] \right\} g,$$

где  $\Delta T$  — градиент температуры на единицу длины столба жидкости (принимается линейным);  $T_0$  — температура у верхнего края столба жидкости.

Поскольку  $k^2 - 4B = R$  и обычно  $R < 0$ , получаем следующее уравнение движения поплавка:

$$x = C_1 \exp\left(-\frac{k}{2}t\right) \cos\left(\frac{R}{4}t + \varphi\right) + \frac{A}{B}. \quad (3-54)$$

Для начальных условий  $t=0$ ,  $x=0$  и  $\frac{dx}{dt}=0$  имеем:

$$C_1 = -\frac{A}{B \cos \varphi},$$

где

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{2k}{R}\right).$$

Следовательно, тело совершает затухающие колебания, амплитуда которых уменьшается во времени пропорционально  $\exp\left(-\frac{k}{2}t\right)$ . Так как постоянная  $k$  равна примерно  $10^{-2}$ — $10^{-3}$ , то равновесие тела наступит примерно через 20 мин, и его окончательное положение характеризуется координатой

$$x = \frac{A}{B} = \frac{T_0 - T_n}{\Delta T}.$$

Интервал времени  $\tau$ , в течение которого твердая частица достигнет равновесного уровня в жидкости, т. е. установится стационарное тепловое состояние, приближенно можно также оценить по уравнению [69]

$$\tau = \frac{C_e v}{d^2 \beta g \Delta T}, \quad (3-55)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости;  $d$  — диаметр твердой частицы;  $\Delta T$  — градиент температуры;  $C_e$  — коэффициент, определяемый выбранной системой единиц.

Таким образом, время достижения равновесного состояния прямо пропорционально вязкости и обратно пропорционально градиенту плотности и квадрату диаметра частицы. Следовательно, в любой жидкости частицы уравниваются быстрее в верхней части цилиндра. В качестве примеров расчета по уравнению (3-55) укажем, что в жидкости на основе бромформа при градиенте температуры  $1-2^\circ\text{C}\cdot\text{см}^{-1}$  частицы диаметром 0,2—1 мм достигают равновесного уровня за 15—25 мин, а более мелкие — за 40—100 мин. В вязких жидкостях (Туле, Клеричи) при тех же условиях равновесие наступает соответственно через 20—40 и 100—200 мин.

Отклонение формы частицы от шара мало влияет на ее движение в цилиндре, важно только обеспечить необходимое соотношение диаметров цилиндра и частицы (не менее 10:1).

Измерение плотности при помощи термоградиентного плотномера сводится к измерению температуры рабочей жидкости у концов цилиндра и расстояния уравновешенного тела от какой-либо базовой точки. Зная температуру, находят плотность жидкости на концах цилиндра, градиент плотности и искомую плотность на требуемом уровне. Однако такая методика не обеспечивает высокой точности, поэтому обычно пользуются другим, более надежным способом, основанным на применении образцов с известной плотностью. Искомую плотность тела находят по его положению в жидкости между двумя соседними образцами или по расстоянию от ближайшего образца, причем градиент плотности определяют как частное от деления разности плотностей образцов на расстояние между ними. Расстояния измеряют при помощи окуляра-микрометра. Важное преимущество этого способа состоит в том, что не требуется знать характеристики жидкости; кроме того, он позволяет одновременно измерять плотность нескольких тел небольших размеров.

Образцами могут служить различные стеклянные тела (шарики) с впаянными в них платиновыми проволочками разной длины или с пузырьком воздуха внутри. Плотность образца измеряют одним из рассмотренных в книге методов. Плотномер должен быть снабжен набором образцов, охватывающим диапазон измерений плотности с интервалом 20—30  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Градиент плотности в концевых частях столба жидкости меняется нелинейно, что связано с изменением коэффициента теплового расширения, поэтому необходимо подбирать плотность жидкости и образцов так, чтобы оба образца при измерении находились в средней части трубки, где соблюдается линейный градиент плотности и, следовательно, обеспечивается высокая точность. Для проверки длины участка, где соблюдается линейность градиента плотности, при-

меняют группу образцов: при длительной выдержке (около 30 мин) относительное расположение образцов не должно изменяться.

Для определения градиента температуры можно использовать также следующий прием [6]. Измеряют положение  $z_1$  образца в цилиндре при данной разности  $\Delta T_1$  температур на концах. Затем температуру на концах цилиндра изменяют на одинаковую величину  $\Delta T_2$  (например,  $1^\circ\text{C}$ ) и после установления равновесия измеряют новое положение  $z_2$  образца. При линейном градиенте температуры имеем  $\frac{dT}{dz} = \frac{\Delta T_2}{z_2 - z_1}$ , тогда искомая плотность тела при температуре равновесия

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + (\beta_{\text{ж}} - \beta_0) \Delta z \frac{dT}{dz} \right], \quad (3-56)$$

где  $\Delta z$  — расстояние между положениями равновесия тела и образца плотностью  $\rho_0$ ;  $\beta_{\text{ж}}$ ,  $\beta_0$  — коэффициент объемного теплового расширения соответственно жидкости и образца (во многих случаях значением  $\beta_0$  можно пренебречь).

Точность термоградиентного плотномера тем выше, чем меньше градиент температуры (плотности) и больше его постоянство, а также чем меньше погрешность измерения расстояний. Так как измерения ведутся относительно образцов, то, очевидно, необходимо учитывать и погрешность, с которой известна плотность этих образцов.

Термоградиентные плотномеры обладают высокой чувствительностью: при градиенте температуры  $0,03^\circ\text{C} \times \text{см}^{-1}$  можно зафиксировать разность плотностей двух тел до  $1 \cdot 10^{-4}$   $\text{кг}/\text{м}^3$ . Чувствительностью прибора легко управлять путем изменения разности температур на концах трубки. Измерив положение равновесия испытуемого тела с погрешностью  $\pm (0,2-0,3)$  мм, при термостатировании с погрешностью  $\pm 0,005^\circ\text{C}$  и градиенте температуры  $0,1^\circ\text{C}\cdot\text{см}^{-1}$  можно добиться погрешности измерения плотности до  $\pm 0,003$   $\text{кг}/\text{м}^3$  [6]. Следует иметь в виду, что при уменьшении градиента плотности увеличивается длительность эксперимента.

Существует много конструкций термоградиентных плотномеров [69], но у всех основным элементом является стеклянный цилиндр внутренним диаметром 5—10 мм и длиной 250—350 мм, вставленный в медную трубку со стенками толщиной 1 мм. Концы трубки помещены в нагреватели, и вся система заключена в теплоизоляционный кожух. Нагревание производится циркулирующей водой, поступающей из двух ультратермостатов, нихромовыми печами со стабилизаторами

температуры, полупроводниковыми элементами или другими способами. Наблюдение за испытуемым телом и образцами ведут через продольную щель в трубке и теплоизоляции; ширина щели равна диаметру цилиндра.

Важно отметить, что при поддержании заданных значений температуры вверху и внизу градиент температуры вдоль столба жидкости практически не меняется с течением времени.

Методика градуировки термоградиентных плотномеров описана в [69].

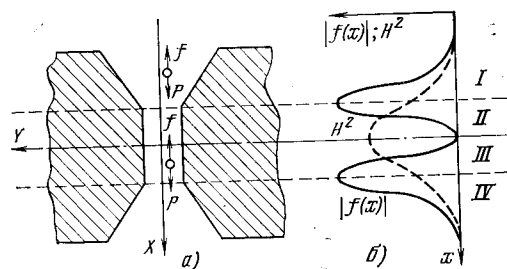


Рис. 3-19. Распределение сил в магнитно-градиентном плотномере.

*a* — силы, действующие на тело между полюсами магнита; *b* — кривые изменения  $H^2$  и  $f(x)$ ;  $P=Mg$ .

Третья разновидность градиентных плотномеров основана на использовании вертикального градиента напряженности магнитного поля. Сила  $F$ , действующая на тело (диамагнитное, парамагнитное) массой  $M$  в зазоре между полюсами магнита, определяется из уравнения (рис. 3-19)

$$F = Mg - f(x), \quad (3-57)$$

причем магнитная сила

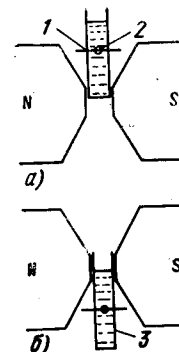
$$f(x) = Mk \operatorname{grad}(H^2), \quad (3-58)$$

где  $k$  — магнитная восприимчивость тела на единицу массы;  $H$  — напряженность магнитного поля.

Как видно из рис. 3-19, при симметричных полюсах произвольной формы с одним минимальным расстоянием между полюсами зависимость квадрата напряженности магнитного поля от координаты  $x$  имеет максимум в центре симметрии. Магнитная сила пропорциональна градиенту квадрата напряженности поля. Изменение с координатой  $x$  абсолютного значения магнитной силы

Рис. 3-20. Принципиальная схема магнитно-градиентного плотмера.

*a* — плотность тела больше плотности жидкости; *b* — плотность тела меньше плотности жидкости; 1 — риска в окуляре; 2 — тело; 3 — цилиндр с жидкостью.



изображается двугорбой кривой, причем поле между полюсами делится на четыре области. В первой и третьей областях магнитная сила по абсолютной величине растет в направлении гравитационной силы ( $\operatorname{grad}|f(x)| > 0$ ). В этих областях возможно устойчивое равновесие тела в магнитном поле. Во второй и четвертой областях магнитная сила по абсолютной величине уменьшается в направлении гравитационной силы. В этих областях возможно лишь неустойчивое равновесие. Таким образом, устойчивое равновесие диамагнитных тел возможно лишь в первой области, а устойчивое равновесие парамагнитных тел — лишь в третьей области, где магнитные силы направлены противоположно весу. Для данного магнита и данной формы полюсов магнитная сила в данной точке зазора между полюсами при прочих равных условиях определяется силой тока в обмотках магнита.

Условия устойчивости равновесия тела в градиентном магнитном поле запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} f(x_1) < Mg < f(x_2); \\ \operatorname{grad}|f(x)| > 0, \end{aligned} \right\} \quad (3-59)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — координаты точек выше и ниже уровня равновесного положения тела.

На рис. 3-20 показана принципиальная схема магнитно-градиентного плотмера [180]. Испытуемое тело погружают в прозрачную парамагнитную жидкость, которая находится в стеклянном сосуде малого диаметра. Если плотность тела больше плотности жидкости, то цилиндр помещают между верхними скосами полюсных наконечников (рис. 3-20, *a*), если же меньше — между нижними (рис. 3-20, *b*). В первом случае градиент напряженности магнитного поля обуславливает появление силы, действующей на тело в направлении уменьшения магнитной силы; последняя уравновешивается на опре-

деленной высоте равнодействующей веса и выталкивающей силы. Изменяя ток в обмотках магнита, добиваются установления тела на заданном уровне, что фиксируют по горизонтальной риске в окуляре микроскопа. Соответствующая напряженность магнитного поля является мерой плотности тела. Градуировка плотномера производится по образцам с известной плотностью.

Чувствительным элементом напряженности магнитного поля служит датчик Холла, располагаемый по другую сторону полюсных наконечников симметрично с местом установки тела. В качестве парамагнитной жидкости используют водные растворы хлористого марганца различной концентрации, а для измерения плотности растворимых в воде веществ — растворы кобальтовой соли олеиновой кислоты в толуоле, четыреххлористом углероде и других растворителях. Чувствительность прибора повышается с уменьшением концентрации жидкости. Сдвиг диапазона измерений достигается добавлением в жидкость растворимой диамагнитной соли.

Из уравнений (3-57) и (3-58), записанных для двух идентичных случаев, когда в жидкость последовательно погружены контрольный образец и испытуемое тело, после преобразований получаем следующее выражение для определения плотности тела:

$$\rho = (\rho_0 - \rho_{ж}) \frac{u}{u_0} \frac{k_{ж} - k}{k_{ж} - k_0} + \rho_{ж}, \quad (3-60)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho_{ж}$  — плотность образца и жидкости;  $u$ ,  $u_0$  — напряжение на выходе датчика Холла в момент уравновешивания тела и образца;  $k$ ,  $k_{ж}$ ,  $k_0$  — магнитная восприимчивость тела, жидкости и образца.

Для диамагнитных тел и образцов уравнение (3-60) можно упростить:

$$\rho = (\rho_0 - \rho_{ж}) \frac{u}{u_0} + \rho_{ж}. \quad (3-61)$$

Погрешность измерений магнитно-градиентным плотномером не превышает  $\pm 0,2\%$ .

## Глава четвертая

### ОБЪЕМНО-ВЕСОВЫЕ ПЛТНОМЕРЫ

#### 4-1. ПИКНОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ

Наиболее точным, но в то же время трудоемким методом является измерение плотности при помощи пикнометра<sup>1</sup>, представляющего собой сосуд определенной вместимости, имеющий требуемую форму. Пикнометрический метод основан на взвешивании испытуемого вещества, занимающего в пикнометре известный объем.

В сравнении с гидростатическим взвешиванием пикнометрический метод обладает рядом преимуществ. Его основные достоинства сводятся к следующему: весьма малая погрешность измерений (до  $\pm 0,0001\%$ ), что обусловлено применением высокоточных весов общего назначения без каких-либо дополнительных устройств, неизбежно уменьшающих чувствительность весов; малая площадь свободной поверхности жидкости в пикнометре, что практически исключает испарение жидкости и уменьшает поглощение влаги из воздуха; пригодность для работы как с летучими, так и с весьма вязкими жидкостями; возможность использования малого количества жидкости (100—0,5 см<sup>3</sup> и менее); раздельное проведение операций термостатирования жидкости в пикнометре и последующего взвешивания.

Поэтому при точных измерениях (например, при исследовательских работах), когда вполне оправданы некоторая трудоемкость и необходимость соблюдения ряда предосторожностей, пикнометрическому методу отдают предпочтение.

К числу основных недостатков пикнометрического метода относятся: трудность поддержания постоянной заданной температуры жидкости во всем ее объеме (невозможность перемешивания); трудность полного исключения влияния влаги при взвешиваниях или введения соответствующей поправки на это влияние; снижение чувствительности весов при взвешивании сравнительно большой массы.

Для определения плотности жидкости выполняют три взвешивания пикнометра: «пустого», заполненного дистиллированной водой до заданного уровня и заполнен-

<sup>1</sup> От греческих слов *ruknos* — плотный и *metreo* — измеряю.

ного испытуемой жидкостью до того же уровня. Первые два взвешивания позволяют определить вместимость пикнометра, а первое и третье — массу испытуемой жидкости в объеме пикнометра. По полученным данным подсчитывают плотность жидкости.

Примем следующие обозначения:  $m_r$  — масса гирь, уравновешивающих пустой пикнометр в воздухе плотностью  $D_1$ ;  $m_{r.в}$  — масса гирь, уравновешивающих пикнометр, заполненный дистиллированной водой при температуре  $t_b$ , в воздухе плотностью  $D_2$ ;  $m_{r.ж}$  — масса гирь, уравновешивающих пикнометр, заполненный испытуемой жидкостью при температуре  $t$ , в воздухе плотностью  $D_3$ ;  $v$  — объем материала пикнометра;  $V_b$  — вместимость пикнометра до заданного уровня при температуре  $t_b$ ;  $V_t$  — то же при температуре  $t$ ;  $\rho_b$  — плотность дистиллированной воды при температуре  $t_b$ ;  $\rho_t$  — плотность испытуемой жидкости при температуре  $t$ ;  $\rho_r$  — плотность материала гирь;  $\rho_n$ ,  $\beta$  — плотность и коэффициент объемного теплового расширения материала пикнометра.

Условия равновесия весов при трех указанных выше последовательных взвешиваниях пикнометра можно записать в виде системы трех уравнений

$$\left. \begin{aligned} m_r(1 - D_1/\rho_r) &= v(\rho_n - D_1); \\ m_{r.в}(1 - D_2/\rho_r) &= v(\rho_n - D_2) + V_b(\rho_b - D_2); \\ m_{r.ж}(1 - D_3/\rho_r) &= v(\rho_n - D_3) + V_t(\rho_t - D_3). \end{aligned} \right\} (4-1)$$

Определив из первого уравнения (4-1) значение  $v$  и подставив его последовательно во второе и третье уравнения, после преобразований получим:

$$A = V_b(\rho_b - D_2) = m_{r.в}(1 - D_2/\rho_r) - m_r[1 - D_1/\rho_r - (D_2 - D_1)/\rho_n]; \quad (4-2)$$

$$B = V_t(\rho_t - D_3) = m_{r.ж}(1 - D_3/\rho_r) - m_r[1 - D_1/\rho_r - (D_3 - D_1)/\rho_n]. \quad (4-3)$$

Так как величины  $V_t$  и  $V_b$  связаны зависимостью

$$V_t = V_b[1 + \beta(t - t_b)], \quad (4-4)$$

то после почленного деления уравнения (4-3) на (4-2) получим:

$$\rho_t = \frac{B(\rho_b - D_2)}{A[1 + \beta(t - t_b)]} + D_3,$$

откуда найдем окончательно

$$\rho_t = \frac{\{m_{r.ж}(1 - D_3/\rho_r) - m_r[1 - D_1/\rho_r - (D_3 - D_1)/\rho_n]\}(\rho_b - D_2)}{\{m_{r.в}(1 - D_2/\rho_r) - m_r[1 - D_1/\rho_r - (D_2 - D_1)/\rho_n]\}[1 + \beta(t - t_b)]} + D_3. \quad (4-5)$$

В ряде случаев при введении определенных условий формула (4-5) может быть упрощена. Если плотность воздуха на протяжении периода, в течение которого выполняются взвешивания, остается постоянной, т. е.  $D_1 = D_2 = D_3 = D$ , или может быть усреднена, то формула (4-5) принимает вид:

$$\rho_t = \frac{m_{r.ж} - m_r}{m_{r.в} - m_r}(\rho_b - D)[1 - \beta(t - t_b)] + D. \quad (4-6)$$

Часто при работе с пикнометром выдерживают одинаковую температуру воды и жидкости, что дополнительно упрощает приведенную выше формулу. Действительно, при  $t_b = t$  имеем:

$$\rho_t = \frac{m_{r.ж} - m_r}{m_{r.в} - m_r}(\rho_b - D) + D. \quad (4-7)$$

Плотность воздуха, входящую в формулы (4-5) — (4-7), определяют в соответствии с указаниями § 3-1.

При постоянной работе с пикнометром удобнее определить заранее его постоянные, т. е. массу и вместимость, с тем чтобы в дальнейшем проводить только одно взвешивание пикнометра для измерения массы испытуемой жидкости в известном объеме. С этой целью преобразуем ранее полученные расчетные уравнения. На основании третьего уравнения (4-1) с учетом (4-4) можно записать:

$$\rho_t = \frac{m_{r.ж}(1 - D_3/\rho_r) - v(\rho_n - D_3)}{V_b[1 + \beta(t - t_b)]} + D_3. \quad (4-8)$$

Вместимость пикнометра  $V_b$  при определенной температуре (обычно нормальной) находят взвешиванием пикнометра, заполненного до требуемого уровня дистиллированной водой или другой жидкостью, плотность которой достоверно известна, например тщательно очищенной ртутью [145]. Расчет ведут по второму уравнению (4-1), которое принимает вид:

$$V_b = \frac{m_{r.в}(1 - D_2/\rho_r) - v(\rho_n - D_2)}{\rho_b - D_2}. \quad (4-9)$$

Значение объема  $v$  материала пикнометра, входящее в уравнения (4-8) и (4-9), определяют взвешиванием пикнометра («пустого»). Из первого уравнения (4-1) имеем:

$$v = m_r \frac{1 - D_1/\rho_r}{\rho_n - D_1} \quad (4-10)$$

Расчеты по приведенным выше уравнениям предполагают, что плотность материала пикнометра известна; если же она неизвестна, ее можно измерить методом гидростатического взвешивания (см. гл. 3).

Таким образом, по экспериментально найденным массам гирь  $m_r$  (взвешивание пикнометра) и  $m_{r,в}$  (взвешивание пикнометра с водой) легко вычислить константы  $v$  и  $V_{в}$ , необходимые для определения искомой плотности жидкости по уравнению (4-8). Для повышения точности определения этих констант рекомендуется производить несколько измерений, беря затем средние значения соответствующих величин. Так как в процессе работы с пикнометром стекло постепенно выщелачивается и стирается (особенно в шлифованных местах), следует периодически повторно определять значения  $m_r$  и  $m_{r,в}$ . Очевидно, что это относится и к пользованию формулами (4-6) и (4-7), в которых величины  $m_r$  и  $m_{r,в}$  являются константами пикнометра.

**Пример 1.** Для измерения плотности жидкости использован пикнометр с меткой. Номинальная вместимость пикнометра 25 см<sup>3</sup>. При взвешиваниях получены следующие данные (с учетом поправок по свидетельствам на гири): масса гирь, уравновешивающих пикнометр с пробкой,  $m_r = 22,6788$  г; масса гирь, уравновешивающих закрытый пикнометр с водой при  $t_{в} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $m_{r,в} = 47,6836$  г; масса гирь, уравновешивающих закрытый пикнометр с испытуемой жидкостью при  $t = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $m_{r,ж} = 51,2654$  г. Температура воздуха в помещении  $t_0 = 21,7^{\circ}\text{C}$ , влажность  $\varphi = 0,52$ . Атмосферное давление  $B = 752$  мм рт. ст.

По табл. 3-1 находим интерполяцией  $P_{в,п} = 19,44$  мм рт. ст. и  $\rho_{в,п} = 0,0177$  кг/м<sup>3</sup>, тогда плотность воздуха согласно уравнению (3-10)

$$D_{21,7} = \frac{1,2930(752 - 0,52 \cdot 19,44)}{760(1 + 0,00366 \cdot 21,7)} + 0,52 \cdot 0,0177 = 1,1785 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность воды при  $20^{\circ}\text{C}$  (приложение 1)  $\rho_{в} = 998,204$  кг/м<sup>3</sup>. Согласно табл. В-2 для термометрического стекла  $\beta = 25 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Искомая плотность жидкости при  $30^{\circ}\text{C}$  по формуле (4-6) составит:

$$\rho_{ж} = \frac{51,2654 - 22,6788}{47,6836 - 22,6788} (998,204 - 1,1785) \times \\ \times [1 - 25 \cdot 10^{-6} (30 - 20)] + 1,1785 = 1139,56 \text{ кг/м}^3.$$

**Пример 2.** При измерении плотности жидкости стеклянным пикнометром (плотность  $\rho_{п} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>) получены следующие данные:

$$m_r = 31,7426 \text{ г } (t_1 = 16^{\circ}\text{C}; B = 747 \text{ мм рт. ст.});$$

$$m_{r,в} = 101,6849 \text{ г } (t_2 = 18^{\circ}\text{C}; B = 742 \text{ мм рт. ст.}; t_{в} = 20^{\circ}\text{C});$$

$$m_{r,ж} = 157,4127 \text{ г } (t_3 = 19^{\circ}\text{C}; B = 739 \text{ мм рт. ст.}; t = 40^{\circ}\text{C}).$$

Воздух в помещении можно считать сухим. Плотность материала гирь  $\rho_r = 8400$  кг/м<sup>3</sup>.

В соответствии с приложением 2 значения плотности воздуха составляют:  $D_{16} = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_{18} = 1,184$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_{19} = 1,175$  кг/м<sup>3</sup>.

Расчет искомой плотности проведем не сразу по формуле (4-5), а постадийно, как это делают иногда в исследовательских лабораториях.

Массу  $M_{п}$  пикнометра определим по формуле, вытекающей (после преобразований) из первого уравнения (4-1):

$$M_{п} = m_r \left( 1 + \frac{D_{16}}{\rho_{п}} - \frac{D_{16}}{\rho_r} \right) = 31,7426 \left( 1 + \frac{1,2}{2500} - \frac{1,2}{8400} \right) = 31,7318 \text{ г.}$$

Для уравновешивания этой массы пикнометра при температурах  $t_2$  и  $t_3$  потребовались бы гири массой

$$m_{r2} = \frac{31,7318}{1 + 1,184/2500 - 1,184/8400} = 31,7212 \text{ г;}$$

$$m_{r3} = \frac{31,7318}{1 + 1,175/2500 - 1,175/8400} = 31,7213 \text{ г.}$$

Следовательно, для уравновешивания воды в пикнометре необходимы гири массой

$$m_{в} = m_{r,в} - m_{r2} = 101,6849 - 31,7212 = 69,9637 \text{ г.}$$

Соответственно, для уравновешивания испытуемой жидкости потребуются гири массой

$$m_{ж} = m_{r,ж} - m_{r3} = 157,4127 - 31,7213 = 125,6914 \text{ г.}$$

Масса воды в пикнометре

$$M_{в} = m_{в} \left( 1 + \frac{D_{18}}{\rho_{в18}} - \frac{D_{18}}{\rho_r} \right) = \\ = 69,9637 \left( 1 + \frac{1,184}{998,595} - \frac{1,184}{8400} \right) = 69,9739 \text{ г,}$$

где  $\rho_{в18} = 998,595$  кг/м<sup>3</sup> по приложению 1.

Масса жидкости в пикнометре

$$M_{ж} = m_{ж} \left( 1 + \frac{D_{19}}{\rho_{ж}} - \frac{D_{19}}{\rho_r} \right) = 125,6914 \left( 1 + \frac{1,175}{1796} - \frac{1,175}{8400} \right) = 127,7555 \text{ г,}$$

где использовано приближенное значение плотности жидкости

$$\rho_{ж} \approx \frac{m_{ж}}{m_{в}} \frac{125,69}{69,96} = 1,796 \text{ г/см}^3 = 1796 \text{ кг/м}^3.$$



Искомая плотность жидкости с учетом соотношения (4-4)

$$\rho_t = \frac{M_{\text{ж}}}{V_t} = \frac{M_{\text{ж}}\rho_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} [1 + \beta(t - t_{\text{в}})].$$

Из приложения 1 при  $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$  имеем  $\rho_{\text{в}20} = 998,204 \text{ кг/м}^3$ , а из табл. В-2 для стекла  $\beta = 25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , тогда

$$\rho_{40} = \frac{127,7555 \cdot 998,204}{69,9739} [1 + 25 \cdot 10^{-6} (40 - 20)] = 1822,57 \text{ кг/м}^3.$$

При измерении плотности твердого тела с помощью пикнометра выполняют три взвешивания: испытуемого тела в воздухе; пикнометра, наполненного жидкостью известной плотности; пикнометра, наполненного той же жидкостью с погруженным в нее испытуемым телом, причем в обоих случаях жидкость наливают до одного и того же уровня, выдерживая одинаковую температуру.

Уравнения равновесия при указанных взвешиваниях запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{г}}(1 - D_{\text{от}}) &= V(\rho_t - D); \\ m_{\text{г.ж}}(1 - D_{\text{от}}) &= M + V_0\rho_{\text{ж}} - (V_0 + v)D; \\ m_{\text{г.т}}(1 - D_{\text{от}}) &= M + V\rho_t + (V_0 - V)\rho_{\text{ж}} - \\ &\quad - (V_0 + v)D, \end{aligned} \right\} (4-11)$$

где  $M$ ,  $v$  — масса и объем материала пикнометра;  $V_0$  — вместимость пикнометра до заданного уровня;  $V$  — объем испытуемого тела;  $m_{\text{г}}$ ,  $m_{\text{г.ж}}$ ,  $m_{\text{г.т}}$  — масса гирь, уравновешивающих соответственно тело в воздухе, пикнометр с жидкостью, пикнометр с жидкостью и погруженным в нее телом.

Указанные выше величины  $v$ ,  $V_0$ ,  $V$ ,  $m_{\text{г.ж}}$ ,  $m_{\text{г.т}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $D$  соотноствуют температуре  $t$ , для которой определяют плотность тела.

Вычитая почленно второе уравнение (4-11) из третьего, получаем:

$$(m_{\text{г.т}} - m_{\text{г.ж}})(1 - D_{\text{от}}) = V(\rho_t - \rho_{\text{ж}}). \quad (4-12)$$

Вычитание уравнения (4-12) из первого уравнения (4-11) дает:

$$(m_{\text{г}} - m_{\text{г.т}} + m_{\text{г.ж}})(1 - D_{\text{от}}) = V(\rho_{\text{ж}} - D). \quad (4-13)$$

Разделив почленно первое уравнение (4-11) на уравнение (4-13), после преобразований получим искомую

формулу для определения плотности твердого тела

$$\rho_t = \frac{m_{\text{г}}(\rho_{\text{ж}} - D)}{m_{\text{г}} + m_{\text{г.ж}} - m_{\text{г.т}}} + D. \quad (4-14)$$

Эту формулу можно представить в виде

$$\rho_t = \frac{m_{\text{г}}\rho_{\text{ж}} - (m_{\text{г.т}} - m_{\text{г.ж}})D}{m_{\text{г}} - (m_{\text{г.т}} - m_{\text{г.ж}})}. \quad (4-15)$$

При многократном использовании пикнометра с определенной жидкостью целесообразно заранее определить величину  $m_{\text{г.ж}}$ , считая ее константой, и в дальнейшем для измерения плотности проводить только два взвешивания: тела в воздухе и пикнометра с жидкостью и погруженным в нее телом.

Измерение плотности газа или пара при помощи пикнометра состоит в трех последовательных взвешиваниях пикнометра: с дистиллированной водой; с сухим воздухом; с сухим исследуемым газом. Первые два взвешивания позволяют найти вместимость пикнометра, а второе и третье — массу газа в нем.

По результатам взвешиваний искомую плотность газа вычисляют, пользуясь уравнениями, которые приведены выше для плотности жидкости, с тем отличием, что испытуемая жидкость заменяется газом. В частности, если температура остается неизменной во время трех взвешиваний пикнометра, то искомая плотность газа на основании уравнения (4-7)

$$\rho_t = \frac{m_{\text{г.г}} - m_{\text{г}}}{m_{\text{г.в}} - m_{\text{г}}}(\rho_{\text{в}} - D) + D, \quad (4-16)$$

где  $m_{\text{г.г}}$  — масса гирь, уравновешивающих пикнометр с газом.

При частом употреблении пикнометра целесообразно предварительно определить его константы, а в последующем взвешивать только пикнометр с испытуемым газом. Пусть при определении констант температура равна  $t'$  и соответственно плотность воздуха  $D'$ , тогда с учетом уравнений (4-9), (4-10) и (4-4) легко получить следующее выражение для вычисления вместимости пикнометра при  $20^\circ\text{C}$  по результатам его взвешивания с водой и с воздухом:

$$V_{20} = \frac{m_{\text{г.в}} - m_{\text{г}}}{\rho_{\text{в}20} - D'} \left(1 - \frac{D'}{\rho_{\text{г}}}\right) [1 - \beta(t' - 20)]. \quad (4-17)$$

Вторая константа — масса  $M$  пикнометра определяется согласно первому уравнению (4-1), преобразованному к виду

$$M = m_r \left( 1 + \frac{D'}{\rho_{\text{п}}} - \frac{D'}{\rho_r} \right). \quad (4-18)$$

Если взвешивание пикнометра с газом происходит при температуре  $t \neq t'$  (соответственно  $D \neq D'$ ), то искомую плотность газа находят согласно уравнению (4-8), которое для данного случая принимает вид:

$$\rho_t = \frac{(m_{r,г} - m_r)(1 - D_{от})}{V_{20}[1 + \beta(t - 20)]} + D, \quad (4-19)$$

где  $V_{20}$ ,  $m_r$  — константы пикнометра.

Плотность  $\rho_{от}$  газа по отношению к сухому воздуху определяется из зависимости

$$\rho_{от} = \frac{M_r - (M_{вз} - V_{20}D_{20})}{V_{20}D_{20}} = \frac{M_r - M_{вз}}{V_{20}D_{20}} + 1, \quad (4-20)$$

где  $M_r$ ,  $M_{вз}$  — масса пикнометра соответственно с газом и воздухом.

Погрешность измерения плотности газов при помощи пикнометров приблизительно  $\pm 0,01\%$  и менее.

**Пример 3.** Масса гирь, уравновешивающих пикнометр с испытуемым газом,  $m_{г,г} = 83,0048$  г. Известны константы пикнометра: масса  $m_r = 83,1254$  г; вместимость  $V_{20} = 270$  см<sup>3</sup>. Барометрическое давление  $B = 728$  мм рт. ст. Температура в витрине весов  $t = 28^\circ\text{C}$ . Дано также:  $\rho_r = 8400$  кг/м<sup>3</sup>;  $\beta = 25 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ .

Плотность воздуха (по приложению 2)  $D_{28} = 1,123$  кг/м<sup>3</sup>.

Искомую плотность газа находим по уравнению (4-19):

$$\rho_{га} = \frac{10^{-3}(83,0048 - 83,1254) \left( 1 - \frac{1,123}{8400} \right)}{10^{-6} \cdot 270 [1 + 25 \cdot 10^{-6} (28 - 20)]} + 1,123 = 0,677 \text{ кг/м}^3.$$

Для пересчета плотности на нормальное состояние газа воспользуемся формулой (В-13), приняв  $K=1$ :

$$\rho_{н} = \frac{\rho_{га} P_{н} T}{P T_{н}} = \frac{0,677 \cdot 760 \cdot 301}{728 \cdot 293} = 0,726 \text{ кг/м}^3.$$

## 4-2. ПИКНОМЕТРЫ

Существует много разновидностей пикнометров, и их применение определяется родом испытуемого вещества, его количеством, а также требуемой точностью измерений. Чем больше вместимость пикнометра для жидкостей и газов, тем меньше относительная погрешность взвешивания; однако одновременно увеличивается ошибка, связанная с неравномерностью температуры во всей массе жидкости (газа). С этой точки зрения наилучшие результаты для жидкостей получают пикнометрами вместимостью 25—100 см<sup>3</sup>; вместе с тем следует подчеркнуть, что высокая точность измерений может быть достигнута и при помощи пикнометров малой вместимости.

Для массовых измерений серийно выпускаются стеклянные колбообразные пикнометры шаровидной формы, которые закрываются либо глухой притертой пробкой (эти пикнометры имеют круговую метку на горловине — рис. 4-1,а и б), либо притертой пробкой с капиллярным отверстием (рис. 4-1,в). Основные размеры шаровидных пикнометров по ГОСТ 22524-77 даны в табл. 4-1.

Таблица 4-1

Размеры шаровидных пикнометров

Номинальная вместимость, см <sup>3</sup>	Размеры пикнометра, мм						
	Рис. 4-1,а (тип ПЖ2)		Рис. 4-1,в (тип ПЖЗ)			Рис. 4-1,б (тип ПТ)	
	H	d	H	h	h <sub>1</sub>	H	h
1	64±2	5±1 <sub>2</sub>	54±5	25±2	30±2	—	—
2	66±2	5±1 <sub>4</sub>	58±5	30±2	30±2	—	—
3	76±2	5±1 <sub>4</sub>	60±5	32±2	30±2	—	—
5	90±5	6±1 <sub>4</sub>	75±7	40±3	40±3	—	—
10	100±5	6±1 <sub>4</sub>	85±10	45±3	40±3	—	—
25	126±5	9±1	98±10	56±3	45±3	155±5	56±3
50	136±5	9±1	107±10	66±3	45±3	170±5	68±3
100	152±5	9±1	115±10	74±3	45±3	—	—

Метка на горловине пикнометра соответствует его номинальной вместимости; до этой метки и заполняют пикнометр. По требованию заказчика на расстоянии 1 мм выше и ниже основной метки наносят по одной дополнительной круговой метке, что упрощает пользование пикнометром.

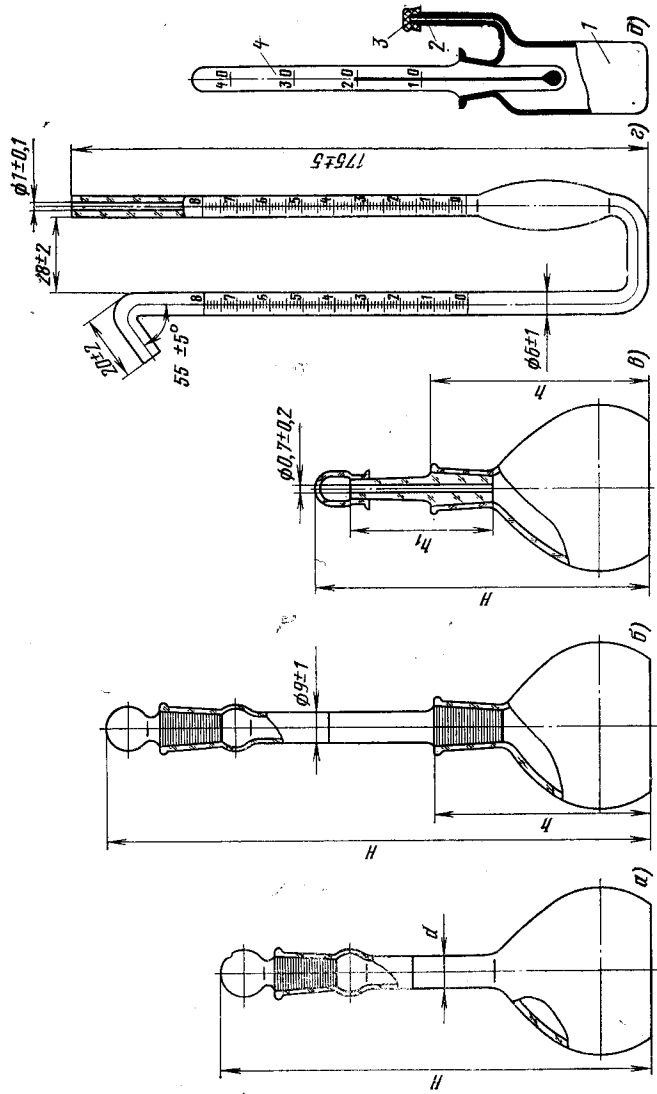


Рис. 4-1. Пикнометры для жидкостей и твердых тел. а, б, в — колбообразные шаровидные; г — U-образный; д — цилиндрический с капиллярной трубкой и термометром.

Верхняя часть горловины (под пробкой) пикнометра с меткой выполняется расширенной. В образующую расширенную полость входит часть жидкости в том случае, когда объем ее увеличивается в результате повышения температуры после заполнения пикнометра до метки.

Пикнометр с капиллярным отверстием в пробке обеспечивает более точные результаты измерений. Диаметр отверстия  $0,7 \pm 0,2$  мм. Вместимость такого пикнометра определяется верхним краем капиллярного отверстия.

При измерении плотности сильно летучих жидкостей применяют U-образный капиллярный пикнометр, изображенный на рис. 4-1,г (тип ПЖ4 по ГОСТ 22524-77). Такой пикнометр представляет собой трубку с капиллярным отверстием диаметром от 0,9 до 1,1 мм. В правом колене имеется расширение. Конец левого колена отогнут. На обоих коленах нанесена равномерная шкала с 80 делениями (каждое деление — 1 мм). Номинальная вместимость U-образного пикнометра, определяемая по нижней его части между нулевыми отметками, составляет 1, 2, 5 и 10 см<sup>3</sup>. Пикнометр целесообразно крепить в специальном штативе [240].

Очень удобен в работе пикнометр (рис. 4-1,д) с боковой капиллярной трубкой 2. Пробкой служит тело термометра 4, пришлифованного к горлу колбы 1. Термометр позволяет вести непрерывные наблюдения за температурой жидкости. Отверстие капилляра закрывается колпачком 3, притертым к конусному концу трубки.

Работа с пикнометром значительно упрощается, если на его горловине или капиллярной трубке нанесена шкала, которая позволяет быстрее и точнее определять объем жидкости. Шкалу градуируют путем измерения длины столбика ртути в капилляре и его взвешивания. Зная массу столбика и плотность ртути, вычисляют общий объем, а затем средний объем, приходящийся на одно деление шкалы. При градуировке ртутью необходимо учитывать объем выпуклого мениска. Градуировку в ряде случаев производят при помощи воды.

По ГОСТ 22524-77 предусмотрены пикнометры со шкалой на горловине (тип ПЖ1) номинальной вместимостью 5, 25, 50 и 100 см<sup>3</sup>. Конструктивно они аналогичны пикнометрам, показанным на рис. 4-1,а.

Для малых количеств жидкости хорошие результаты получают с помощью пипеткообразного пикнометра (пикнометра Оствальда — Шпренгеля). Он представляет собой U-образную трубку с расширением в одном колене и отогнутыми под прямым углом концами, один из которых (ведущий от расширения) короче другого. Оба конца трубки закрыты притертыми колпачками. Пикнометр заполняют жидкостью до края отверстия на коротком конце и до метки на другом конце.

С различными конструкциями нестандартных пикнометров можно познакомиться в работах [125, 192, 240, 275]. Для измерений при температурах, превышающих температуру кипения жидкости, применяют запаянный капиллярный пикнометр [112]. Пикнометр для высоких давлений описан в [68].

В зависимости от назначения и условий работы пикнометры изготовляют из стекла, кварца, графита, металлов (меди, никеля, тантала и др.), тугоплавких окислов металлов (алюминия, циркония) и других материалов [192, 236].

Наиболее точны стеклянные и кварцевые пикнометры, но их применение ограничено невысокими температурами. Преимуществами графитовых пикнометров являются сравнительно высокая допустимая температура, химическая инертность по отношению ко многим жидкостям (в том числе жидким металлам и сплавам), малый коэффициент теплового расширения, хорошая обрабатываемость (т. е. возможность соблюдения весьма малых допусков на обработку). Наибольший температурный диапазон обеспечивают металлические пикнометры, однако на их точность влияют окисление и взаимодействие с испытуемой жидкостью. Эти пикнометры применяют и для сжиженных газов.

Особую группу образуют пикнометры для весьма малых количеств жидкости (десятые и сотые доли кубического сантиметра) — так называемые микропикнометры. В большинстве случаев микропикнометры представляют собой капиллярную трубку, снабженную шкалой (наподобие стеклянного термометра). Испытуемая жидкость засасывается в капилляр с помощью или сифона, или медицинского шприца, игла которого вводится в капилляр, или путем вакуумирования. Благодаря капиллярному давлению полностью исключено самопроизвольное перемещение жидкости в трубке. Погрешность измере-

ния подобными пикнометрами составляет примерно  $\pm 0,1\%$ .

Точность измерения плотности стеклянным пикнометром в значительной степени зависит от чистоты поверхности стекла внутри и снаружи прибора. Поэтому, приступая к измерениям, пикнометр необходимо тщательно промыть последовательно хромовой смесью, дистиллированной водой и ректифицированным этиловым спиртом. Если пикнометр загрязнен маслом, то сначала следует промыть его бензином, а затем указанными жидкостями. Промытый пикнометр необходимо хорошо просушить.

Пикнометры с достаточно широким горлом при промывке заполняют жидкостью при помощи пипетки с оттянутым капилляром. Для заполнения пикнометров с узким горлом (капиллярным отверстием) приходится создавать вакуум. С этой целью к пикнометру подключают сифон, одно колено которого выполнено в виде капилляра, а другое — в виде широкой трубки. Капиллярную трубку вводят в пикнометр, а широкую — в сосуд с жидкостью. Капиллярная трубка имеет боковой отрезок, который присоединяют к водоструйному насосу. Трубка сифона должна подходить близко ко дну пикнометра.

Для стока жидкости между пикнометром и насосом включают колбу, в которую опущены трубки, соединенные с пикнометром и насосом; колба должна иметь сливной кран. При просушивании широкую трубку сифона соединяют последовательно с четырьмя банками: в первой (считая от пикнометра) находится стеклянная и хлопчатобумажная вата для очистки воздуха от механических примесей, во второй и третьей — серная кислота, в четвертой — хлористый кальций.

Капиллярный пикнометр, показанный на рис. 4-1,2, заполняют жидкостью без применения дополнительных устройств: при погружении отогнутого конца трубки в жидкость последняя сначала затягивается под действием капиллярных сил, а затем по принципу сифона заполняет весь пикнометр. Возможность заполнения пикнометра без создания вакуума имеет особое значение при работе с летучими жидкостями.

Промытый и просушенный пикнометр взвешивают (вместе с пробойкой) на аналитических весах класса I с микрошкалой (цена деления 0,1 мг). При этом следует применять способ взвешивания на одном плече [62]. Затем пикнометр наполняют свежей дистиллированной водой несколько выше метки (пикнометр с круговой меткой) или до края отверстия (пикнометр с капиллярным отверстием) и выдерживают не менее получаса в термостате или водяной ванне при требуемой температуре (обычно 20°C). Пикнометр устанавливают в термостате на пробковом поплавке. Для уменьшения отложений на поверхности пикнометра рекомендуется термостат заполнить дистиллированной водой.

Точность поддержания температуры термостата определяется требуемой точностью измерений. Для получения значения плотности с погрешностью в четвертом десятичном знаке достаточно поддерживать температуру постоянной с отклонениями в пределах  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . При более точных измерениях предельная погрешность поддержания постоянной температуры должна быть порядка 0,01—0,02°C, а иногда и менее. Если пикнометр не оснащен термометром, то для контроля за температурой жидкости внутри пикнометра в термостат

помещают небольшую колбу с термометром, наполненную той же жидкостью.

Когда температура воды в пикнометре, а следовательно, и ее уровень перестанут изменяться, излишек воды над меткой удаляют таким образом, чтобы метки касался нижний или верхний край мениска в зависимости от того, определяют ли плотность соответственно прозрачной или непрозрачной жидкости. За положением мениска следуют наблюдать через лупу или катетометр. Отбирать излишек воды необходимо весьма осторожно, используя для этой цели пипетку с оттянутым капилляром или согнутую в трубку фильтровальную бумагу. Весьма малые количества воды удобно отбирать узкой полоской фильтровальной бумаги.

Пикнометр, снабженный вместо одной метки шкалой, можно наполнять до любого положения мениска, если предварительно определена цена деления шкалы. У пикнометров с капиллярным отверстием, помещенных в термостат, излишек воды, выступающий из отверстия, удаляют фильтровальной бумагой.

После того как уровень воды установится против метки, внутреннюю поверхность горла пикнометра вытирают свернутой в трубку фильтровальной бумагой (при этом бумага не должна касаться мениска воды). Пикнометр с водой закрывают пробкой и тщательно обтирают снаружи льняной тряпкой, не оставляющей на поверхности пикнометра хлопьев, которые могут изменить массу пикнометра. Затем пикнометру дают возможность принять температуру окружающего воздуха, после чего взвешивают его на указанных выше весах.

Для получения более точного результата рекомендуется описанное испытание повторять несколько раз и принимать в расчет среднее из найденных таким образом значений. Далее аналогичным путем взвешивают пикнометр с испытуемой жидкостью. Предварительно пикнометр промывают и высушивают.

Перед измерениями пикнометр с жидкостью, не закрытый пробкой, рекомендуется нагреть до кипения жидкости для удаления из нее растворенного воздуха. Измерения выполняют после охлаждения пикнометра.

Плотность вязких жидкостей определяют в пикнометре с меткой, нанесенной на вставной горловине (рис. 4-1,б). Очень вязкие жидкости до заливки в пикнометр предварительно нагревают до 50—60°C. Для удаления пузырьков воздуха пикнометр с жидкостью в течение 20—30 мин нагревают при температуре 80—100°C (в зависимости от вязкости жидкости) и затем охлаждают до температуры, требуемой для измерения плотности.

При измерении плотности расплавленных металлов можно использовать графитовый пикнометр в виде сосуда с точно выполненной цилиндрической полостью, закрываемой крышкой [236]. Объем полости определяют расчетным путем по ее измеренным фактическим размерам. Искомую плотность вычисляют непосредственно по массе и объему вещества, т. е. этот способ является абсолютным; его погрешность  $\pm 0,05\%$ .

Аналогичный способ был применен, например, для прецизионных измерений плотности жидкой ртути при помощи кварцевого сосуда с кубической полостью [145].

Уменьшение погрешности измерения до  $\pm 0,0001\%$  обеспечивает дифференциальный пикнометрический метод, основанный на применении двух пикнометров с ка-

пиллярной шейкой, имеющих по возможности одинаковую вместимость. Капилляр каждого пикнометра, снабженный меткой, предварительно калибруется. Пикнометр наполняют жидкостью выше метки и измеряют высоту уровня над меткой с помощью катетометра.

Измерения проводят в два этапа: сначала в пикнометр № 1 заливают исследуемую жидкость и в пикнометр № 2 — контрольную жидкость известной плотности, а затем наоборот, в пикнометр № 1 — контрольную жидкость, в пикнометр № 2 — исследуемую жидкость. На каждом этапе оба пикнометра выдерживают в одном и том же термостате при требуемой температуре и после отсчета уровней помещают на разные чашки аналитических весов для определения разности масс. При этом оба раза каждый пикнометр устанавливают на одну и ту же чашку. Промывку, наполнение, сушку пикнометров производят с соблюдением указанных выше рекомендаций по пользованию пикнометрами.

Условия равновесия весов при двух взвешиваниях дают следующие уравнения:

при первом взвешивании

$$M_1 - v_1 D + (V_1 + \Delta V'_1)(\rho_K - D) = \\ = M_2 - v_2 D + (V_2 + \Delta V''_2)(\rho - D) + m_1(1 - D_{от});$$

при втором взвешивании

$$M_1 - v_1 D + (V_1 + \Delta V''_1)(\rho - D) = \\ = M_2 - v_2 D + (V_2 + \Delta V''_2)(\rho_K - D) + m_2(1 - D_{от}),$$

где  $M$ ,  $v$  — масса и объем материала пикнометра;  $V$  — вместимость до метки;  $\Delta V$  — объем жидкости над меткой;  $m$  — разность масс пикнометров с жидкостями;  $D$  — плотность воздуха;  $D_{от}$  — отношение плотностей воздуха и материала гирь;  $\rho_K$  и  $\rho$  — плотность контрольной и исследуемой жидкости. Индексы ' и '' при  $\Delta V$  соответствуют первому и второму наполнениям пикнометров, индексы 1 и 2 при  $M$ ,  $v$ ,  $V$  и  $\Delta V$  — номерам пикнометров.

Совместное решение записанных уравнений после отбрасывания пренебрежимо малых величин  $D[(\Delta V'_1 - \Delta V''_2) - (\Delta V''_1 - \Delta V''_2)]$  и  $(m_1 - m_2)D_{от}$  позволяет получить выражение для определения искомой плотности

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) + \rho_K(V_1 + V_2 + \Delta V'_1 + \Delta V''_2)}{V_1 + V_2 + \Delta V''_1 + \Delta V''_2}. \quad (4-21)$$

Как видим, при дифференциальном методе не требуется знать массы пустых пикнометров, а также учи-

тывать плотность воздуха (влияние выталкивающей силы компенсируется благодаря применению двух пикнометров приблизительно одинакового объема). По этой же причине можно пренебречь влиянием влажности при взвешивании.

Для измерения плотности твердого материала удобен пикнометр с меткой, нанесенной на вставной горловине (см. рис. 4-1,б). Методика пользования пикнометром описана выше (см. также [64, 76]). С другими конструкциями пикнометров для твердых веществ можно ознакомиться в [64, 125].

Перед измерениями испытуемое тело промывают в спирте и высушивают.

При выборе размеров пикнометра и массы испытуемого образца (пробы вещества) следует исходить, в частности, из того, что абсолютная погрешность измерения плотности уменьшается с увеличением массы образца и уменьшением объема пикнометра.

В тех случаях, когда испытуемое тело не проходит через отверстие в горле стандартного пикнометра и не может быть измельчено (при определении плотности целого изделия, например гири), в качестве пикнометра применяют цилиндрический стеклянный стакан с притертой к его краям плоской стеклянной крышкой. Стакан наполняют соответствующей вспомогательной жидкостью так, чтобы при надвигании крышки на плоскость краев стакана жидкость «срезалась» и под крышкой не оставались воздушные пузырьки.

В качестве рабочей жидкости обычно используют дистиллированную воду. Если испытуемое тело растворяется или окисляется в воде, то применяют какую-либо другую подходящую жидкость (см. § 3-2).

Измельченные и порошкообразные вещества, погруженные в жидкость, удерживают на своей поверхности пузырьки воздуха, что препятствует точным измерениям, поэтому предварительно воздух удаляют нагреванием жидкости или отсасыванием с помощью вакуумного насоса.

Для измерений плотности газов, не содержащих легко конденсирующихся парообразных веществ, при атмосферном давлении и комнатной температуре применяют колбообразные шаровидные пикнометры из стекла соответственно с одним или двумя хорошо притертыми одноходовыми кранами по ГОСТ 7995-68 (рис. 4-2). У двух-

крановых пикнометров отводные трубки могут быть расположены и по радиусу шара. Пикнометры согласно рис. 4-2,в стандартизованы (тип ПС по ГОСТ 22524-77) и выпускаются двух типоразмеров с номинальной вместимостью 100 см<sup>3</sup> [ $H=(100\pm 5)$  мм;  $d=(65\pm 2)$  мм] и 200 см<sup>3</sup> [ $H=(115\pm 2)$  мм;  $d=(78\pm 2)$  мм]. Их номинальная масса равна соответственно 75 и 80 г. Двухкрановые пикнометры позволяют наиболее полно производить продувку воздухом и газом и тем самым обеспечивать представительную пробу. Они также более удобны в работе, чем однокрановые.

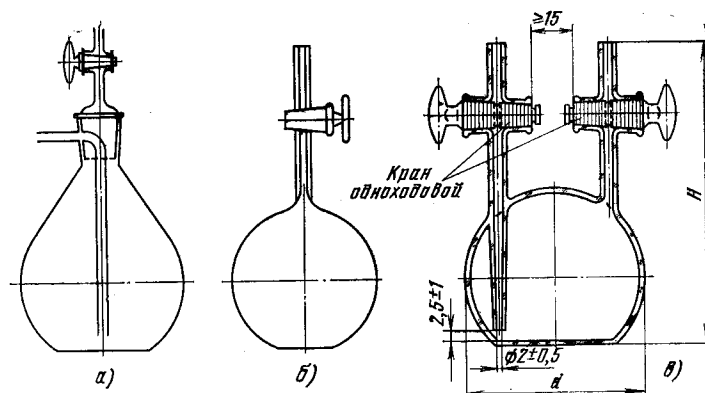


Рис. 4-2. Крановые пикнометры для газов.  
а, б — одноканальные; в — двухканальный.

На рис. 4-3 показаны бескрановые пикнометры малой вместимости (0,05 см<sup>3</sup> и более), в которых краном служит притертая пробка, изготовляемая из стеклянной трубки с одним запаянным концом. На половине высоты горла пикнометра выполнен боковой канал. На уровне канала в стенке пробки сделано отверстие, так что в положении, показанном на рис. 4-3,а, пикнометр открыт и сообщается с окружающей средой, а в положении на рис. 4-3,б — герметически закрыт. Для удобства взвешивания на корпус микропикнометра предусматривают крючок (рис. 4-3,в), который используют при подвешивании к чашке весов.

Перед измерениями пикнометр промывают хромовой смесью, водопроводной водой, а затем дистиллированной водой. Муфты и пробки кранов протирают досуха и смазывают тонким слоем лано-

лина. Пикнометр через длинную трубку заполняют из напорного сосуда с тубусом свежeproкипяченной и охлажденной дистиллированной водой, доведенной до комнатной температуры, следя за тем, чтобы на стенках внутри пикнометра и в каналах трубок и кранов не оставалось пузырьков воздуха. Заполненный пикнометр оставляют с открытыми кранами около весов на 30 мин, затем краны закрывают, излишек воды из отростков кранов удаляют фильтровальной бумагой. После протирки снаружи мягкой тканью пикнометр с водой взвешивают на аналитических весах.

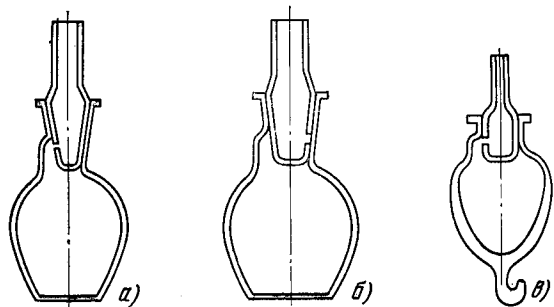


Рис. 4-3. Бескрановые микропикнометры для газов.

а — пробка в открытом положении; б — пробка в закрытом положении; в — пикнометр с крючком для подвешивания.

Пикнометр освобождают от воды, промывают два раза этиловым спиртом, продувают воздухом через фильтр из ваты, высушивают и наполняют воздухом.

Для заполнения двухтрубного пикнометра сухим воздухом служит установка, показанная на рис. 4-4 (ГОСТ 17310-71). В качестве поглотителя влаги в трубках 6 используют вещество, не реагирующее с отдельными компонентами газа и обеспечивающее полноту осушки (например, безводный хлористый кальций). Сосуд 8 наполняют вазелиновым или трансформаторным маслом так, чтобы глубина погружения трубки была 3—5 мм.

Проверив герметичность установки, через пикнометр пропускают не менее 12 объемов сухого воздуха при расходе 130—150 см<sup>3</sup>/мин, устанавливаемом по реометру. Подачу воздуха прекращают, закрывая сначала выпускной кран, а затем впускной. Отключенный от установки пикнометр переносят к весам, удерживая его отростки кранов. После выдержки рядом с весами в течение 30 мин пикнометр соединяют со счетчиком пузырьков, открывают кран и снижают давление в пикнометре до атмосферного (выделение пузырьков должно прекратиться). Закрыв кран, пикнометр отсоединяют от счетчика, тщательно протирают снаружи и взвешивают.

Ту же установку применяют при заполнении пикнометра исследуемым газом (паром). Давление газа должно быть равно атмосферному. Газы легче воздуха вводят в пикнометр через короткую трубку, а газы тяжелее воздуха — через длинную. Выходящий из

счетчика газ направляют за пределы помещения (если необходимо, — через вытяжное устройство).

При пользовании однокрановым пикнометром воздух и газ удаляют из него с помощью газовой бюретки, снабженной ртутным затвором, или вакуум-насоса; наполнение газом производят путем подключения пикнометра к бюретке.

При измерении плотности регистрируют барометрическое давление и температуру, что необходимо для приведения найденной плотности газа к нормальным условиям по уравнению (В-13); учитывая,

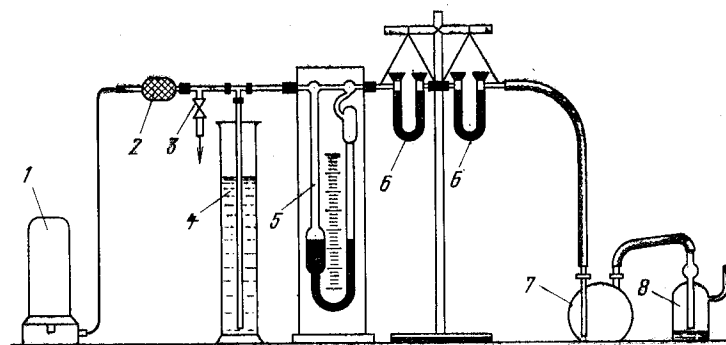


Рис. 4-4. Установка для заполнения двухтрубного пикнометра воздухом (газом).

1 — источник воздуха (газа); 2 — прямая труба с расширением, заполненная гигроскопической ватой; 3 — стеклянный кран; 4 — цилиндр с вазелиновым или трансформаторным маслом (высота уровня 200—250 мм); 5 — реометр, заполненный вазелиновым или трансформаторным маслом; 6 — U-образная трубка (ГОСТ 9064-71) с поглотителем влаги; 7 — пикнометр; 8 — счетчик пузырьков воздуха (газа).

что температура и давление незначительно отличаются от нормальных, можно принимать коэффициент сжимаемости  $K=1$ .

Рассмотренная методика измерений плотности газов может быть усовершенствована путем добавления к указанным выше трем взвешиваниям четвертого взвешивания вакуумированного пикнометра [74, 216]. Для этого предварительно пикнометр, открыв один кран, подключают к вакуум-насосу, откачивают воздух и закрывают кран. По результатам третьего и четвертого взвешиваний вычисляют массу газа в объеме пикнометра, что дает более высокую точность в сравнении с первым способом, так как обычно массы газа и воздуха соизмеримы и их разности весьма малы. Дополнительное упрощение расчетов и повышение точности за счет устранения влияния колебаний температуры и давления достигается при использовании во время третьего и четвертого взвешиваний противовеса в виде закрытого сосуда (пикнометра), имеющего приблизительно те же характеристики — массу, наружный объем, что и рабочий пикнометр. В этом случае массу газа определяют непосредственно (без поправки на выталкивающую силу) как разность или сумму масс гирь, которые уравнивают пикнометр — сначала вакуумированный

(гири  $m_1$ ), а затем заполненный газом (гири  $m_2$ ), тогда искомая плотность газа

$$\rho_t = \frac{m_1 \pm m_2}{V_{20} [1 + \beta(t - 20)]}, \quad (4-22)$$

причем в числителе знак плюс ставят, когда гири располагаются на разных чашках весов (газ тяжелее воздуха), а минус — когда на одних и тех же чашках (газ легче воздуха).

Представляет интерес дифференциальный пикнометрический метод, основанный на применении двух пикнометров с приблизительно равными объемами и массами. Пикнометры, наполненные соответственно воздухом и газом, уравнивают на весах, затем их опорожняют, промывают, заполняют наоборот: первый — газом, а второй — воздухом, и снова уравнивают, причем каждый пикнометр оба раза помещают на одну и ту же чашку весов.

Обозначим:  $M_1, M_2$  — массы пикнометров;  $V_1, V_2$  — их вместимости при нормальном давлении;  $\rho_t, D_t$  — плотность газа и воздуха при нормальном давлении и температуре  $t$ ;  $B_1, B_2$  — барометрическое давление при первом и втором заполнениях пикнометров;  $m_{л1}, m_{л2}, m_{п1}, m_{п2}$  — массы гирь на левой и правой чашках весов при первом и втором уравниваниях.

Учитывая, что объем газа при постоянной температуре и некотором давлении  $P$  в сосуде, вместимость которого при нормальном давлении равна  $V_n$ , составляет  $760V_n/P$  и что при первом взвешивании на левой чашке находится пикнометр № 1 с газом, а на правой — пикнометр № 2 с воздухом, записываем уравнение

$$M_1 + V_1 \rho_t \frac{760}{B_1} + m_{л1} = M_2 + V_2 D_t \frac{760}{B_2} + m_{п1}, \quad (4-23)$$

где выталкивающие силы не учтены ввиду того, что  $V_1 \approx V_2$ .

Аналогично для второго взвешивания, когда слева находится пикнометр № 1 с воздухом, а справа — пикнометр № 2 с газом, причем давление изменилось, имеем:

$$M_1 + V_1 D_t \frac{760}{B_2} + m_{л2} = M_2 + V_2 \rho_t \frac{760}{B_1} + m_{п2}. \quad (4-24)$$

Почленным вычитанием уравнений (4-23) и (4-24) получим выражение для искомой плотности газа

$$\rho_t = D_t \frac{B_1 V_1 + B_2 V_2}{B_2 V_1 + B_1 V_2} + \frac{B_1 B_2 (\Delta m_1 - \Delta m_2)}{760 (B_2 V_1 + B_1 V_2)}, \quad (4-25)$$

где  $\Delta m_1, \Delta m_2$  — разности масс гирь соответственно при первом и втором взвешивании.

Дифференциальный метод обладает следующими достоинствами: разность масс пикнометров, являющаяся мерой искомой плотности, определяется дважды; поправки на действие выталкивающих сил исключены; влияние температуры и давления сведено к минимуму; масса пикнометров играет вторичную роль.

Для измерения плотности пара при повышенной температуре служит тонкостенный шаровидный пикнометр с удлиненным капиллярным отростком, показанный на рис. 4-5 [74]. Обычно используют пикнометры вместимостью от 50 до 500 см<sup>3</sup>. Пикнометр 3 взвешивают на аналитических весах, крепят в держателе 1 и погружают в термостат 2, наполненный жидкостью, температура кипения которой выше температуры кипения исследуемой жидкости при атмосферном давлении не менее чем на 20°C. Кончик отростка пикнометра погружают в стакан 4 с исследуемой жидкостью, плотность пара которой подлежит измерению.

Увеличивая температуру в термостате, заставляют воздух выходить из пикнометра пузырьками через жидкость в стакане. Затем пикнометр охлаждают, в результате чего в пикнометр засасывается некоторое количество жидкости из стакана. Повторяя эту операцию несколько раз, собирают в пикнометре некоторое количество (15—20 см<sup>3</sup>) жидкости. Затем жидкость в термостате доводят до кипения, при этом жидкость в пикнометре испаряется, ее пар заполняет всю полость шара, вытесняя воздух; избыток пара также выходит через капилляр. После того как вся жидкость испарится, осторожно удаляют стакан, обогревают горелкой кончик капилляра для удаления оставшихся на нем капель жидкости и тонким пламенем оплавливают его. Одновременно фиксируют температуру в термостате и барометрическое давление.

Пикнометр вынимают из термостата, охлаждают до

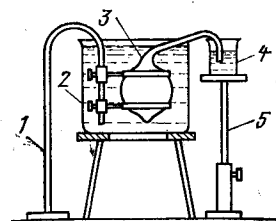


Рис. 4-5. Пикнометрическая установка для паров.

1 — держатель пикнометра; 2 — термостат; 3 — пикнометр; 4 — сосуд с жидкостью; 5 — стойка.



комнатной температуры, обтирают и высушивают его наружную поверхность. При охлаждении пар конденсируется. Рекомендуется охлаждение производить с опущенным вниз капилляром с тем, чтобы одновременно проверять качество запаивания его конца (через слой конденсата не должен просачиваться воздух внутрь пикнометра). После взвешивания пикнометр погружают в свежерокипяченную, но охлажденную дистиллированную воду и отламывают предварительно надпиленный конец капилляра; вода засасывается и заполняет пикнометр. Обсушенный снаружи пикнометр с водой и отломанный конец капилляра взвешивают. Взвешивание пикнометра с водой необходимо для определения его вместимости.

Введем следующие обозначения:  $m_{вз}$ ,  $m_{п}$ ,  $m_{в}$  — масса гирь, уравновешивающих пикнометр, заполненный соответственно воздухом, конденсатом (паром) и водой;  $t$ ,  $B$  — температура пара и барометрическое давление в момент запаивания капилляра;  $t_{в}$ ,  $B_{в}$  — температура и давление в витрине весов;  $D$  — плотность воздуха при  $t_{в}$  и  $B_{в}$  [см. уравнение (3-10)];  $\beta$  — коэффициент объемного теплового расширения стекла;  $\rho_{в}$  — плотность воды при взвешивании пикнометра с водой.

Если записать уравнения равновесия весов при трех последовательных взвешиваниях, то для искомой плотности пара легко получить выражение

$$\rho_{tB} = \left[ \frac{m_{п} - m_{вз}}{m_{в} - m_{вз}} (\rho_{в} - D) + D \right] [1 - (t - t_{в})]. \quad (4-26)$$

Описанный метод измерения дает погрешность  $\pm 0,1\%$  и менее.

Можно применять также способ, обратный описанному: известное по массе количество жидкости нагревают до полного испарения и измеряют объем, занимаемый паром при определенных значениях температуры и давления. Преимущество этого способа обусловлено тем, что он позволяет работать при пониженном давлении, т. е. доводить жидкость до кипения при низкой температуре. Жидкость в количестве нескольких граммов вводят в тонкостенную стеклянную ампулу с капиллярным отростком, масса которой известна. Взвесив ампулу с жидкостью, находят массу жидкости. Основным элементом прибора (рис. 4-6) является калиброванный цилиндр 1 диаметром 10—20 мм и высотой примерно 90 см, снабженный шкалой в единицах объема. Цилиндр, заполненный сухой ртутью, не содержащей воздушных пузырей, опрокидывают в сосуд 3 с ртутью, так что в верхней части цилиндра образуется вакуум. В цилиндр

снизу вводят ампулу (во избежание удара ампулы цилиндр первоначально ставят наклонно). Затем на цилиндр надевают трубу 2, по которой пропускают пар из парогенератора с температурой, превышающей на 10—20°C температуру кипения исследуемой жидкости. Испарение жидкости в ампуле вызывает повышение давления и понижение уровня ртути в цилиндре. Объем пара отсчитывают непосредственно по шкале на цилиндре.

Обозначим:  $m$  — масса жидкости, г;  $v$  — объем ртути, вытесненной паром, см<sup>3</sup>;  $B$  — барометрическое давление, мм рт. ст.;  $H$  — давление столба ртути в цилиндре, мм рт. ст.;  $h$  — давление паров рту-

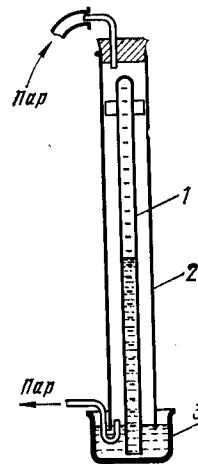


Рис. 4-6.

Рис. 4-6. Установка с пикнометром, содержащим известную массу пара.

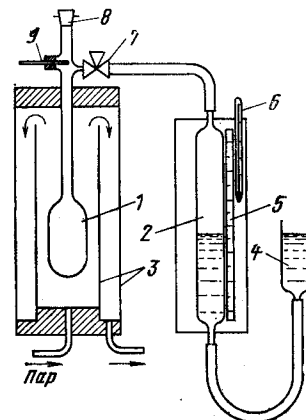


Рис. 4-7.

Рис. 4-7. Определение объема пара вытеснением воздуха.

1 — колбообразный сосуд; 2 — мерный сосуд; 3 — термостат; 4 — подвижный сосуд; 5 — шкала объема; 6 — пикнометр; 7 — трехходовой кран; 8 — притертая пробка; 9 — подвижный упор.

ти при температуре  $t$ , мм рт. ст. Тогда плотность пара исследуемой жидкости, отнесенная к нормальному состоянию, кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_{п} = \frac{m}{v} \frac{76 \cdot 10^4}{B - H - h} [1 + 0,00366t]. \quad (4-27)$$

Применение данного способа ограничено температурой примерно 220°C.

Существует разновидность этого способа измерения, в которой используют тонкостенную ампулу известной массы, аналогичную пикнометру, показанному на рис. 4-5. Ее вместимость выбирают так, чтобы жидкость после испарения заняла объем около 100 см<sup>3</sup>. После заполнения жидкостью и запаивания капилляра ампулу взвешивают

вместе с остатком капилляра, тем самым находят массу жидкости. Объем образующегося пара определяют по объему вытесненного им воздуха при тех же значениях температуры и давления, а этот объем измеряют при комнатных условиях. Принципиальная схема измерительной установки дана на рис. 4-7. Вертикально расположенный колбообразный стеклянный сосуд 1 вместимостью около 300 см<sup>3</sup> припаян к длинной трубке диаметром 10 мм, отрезок которой соединен резиновым шлангом с сообщающимися сосудами 2 и 4, наполненными водой. Сосуд 2 калиброван, его шкала градуирована в единицах объема. Трехходовой кран 7 служит для сообщения колбы и сосуда 2 с атмосферой.

Колба помещена в стеклянный цилиндр, который снаружи обогревается паром из парогенератора, имеющим температуру, превышающую на 20—25°C температуру кипения жидкости, плотность паров которой необходимо измерить. В отрезке трубки колбы в резиновом уплотнении установлена стеклянная палочка 9, на выступающий конец которой помещают ампулу, вводя ее сверху. После прогрева и проверки герметичности установки при отключении сосудов 1 и 2 от атмосферы сосуд 4 устанавливают так, чтобы уровень воды находился сверху сосуда 2.

Поместив ампулу на палочку 9, выравнивают уровни воды в сосудах. При закончившемся прогреве в колбе установится атмосферное давление и уровни воды в сосудах не изменятся. Положение уровня в сосуде 2 фиксируют. Далее перемещением палочки 9 сбрасывают ампулу на дно колбы, она разрушается (от удара или от давления испаряющейся в ней жидкости) и жидкость быстро испаряется, вытесняя воздух из колбы. Уровень воды в сосуде 2 опускается. Перемещая вниз сосуд 4, снова выравнивают уровни воды и тем самым устанавливают в колбе атмосферное давление. При этом фиксируют новое положение уровня в сосуде 2.

Таким образом, исследуемый пар вытеснил из колбы горячий воздух, объем которого равен объему  $V_n$  пара. Этому объему соответствует при комнатной температуре объем  $V$  воздуха, определяемый по шкале сосуда 2. По закону Гей-Люссака

$$V_n = V \frac{T_n}{T}, \quad (4-28)$$

где  $T_n$  — температура пара, К;  $T$  — температура воздуха в сосуде 2, К, тогда искомая плотность пара, соответствующая барометрическому давлению и температуре в термостате,

$$\rho = \frac{mT}{VT_n}, \quad (4-29)$$

где  $m$  — масса жидкости в ампуле.

Для получения надежных результатов измерения следует провести несколько раз и взять среднее значение. Погрешность этого способа  $\pm(0,5—1,0)\%$ . Некоторые улучшения схемы, позволяющие повысить точность и надежность измерений, описаны в [74]. Для работы при весьма высоких температурах ампулу изготавливают из фарфора, иридия и других термостойких материалов. Размеры ампулы и соответственно потребное количество исследуемой жидкости в этом случае существенно уменьшаются.

### 4-3. ДИЛАТОМЕТРЫ И ПЬЕЗОМЕТРЫ

Пикнометрический метод измерения плотности используется также при работе с так называемыми дилатометрами и пьезометрами. Дилатометр представляет собой калиброванный сосуд цилиндрической или колбообразной формы с узкой горловиной, на которой имеется кольцевая метка. Сосуд заполняют испытуемой жидкостью с известной массой, а ее объем определяют путем измерения высоты уровня относительно метки с помощью катетометра [14, 252] или другого устройства (электро-контактного [26, 188] и т. д.), если визуальное наблюдение невозможно. Искомую плотность вычисляют по формуле (В-1).

Дилатометры применяют главным образом для установления зависимости плотности жидкости от температуры (до 1000°C и выше), так как они позволяют сравнительно просто непосредственно измерять изменение объема при постоянной массе жидкости, т. е. изменение плотности.

Пьезометр — это пикнометрическое устройство, предназначенное для исследования зависимости плотности от давления и температуры. Существуют пьезометры постоянной или переменной вместимости. При работе с пьезометрами первого типа измеряют массу исследуемого вещества, которая является переменной величиной, зависящей от давления и температуры, в то время как заранее определенная вместимость пьезометра остается постоянной (ее изменение в зависимости от давления и температуры учитывается введением соответствующих поправок). В пьезометрах второго типа известная масса исследуемого вещества постоянна, а его объем изменяется с изменением температуры и давления.

Принципиальная схема установки с жидкостным пьезометром постоянной вместимости показана на рис. 4-8. Пьезометр 1 выполнен в виде толстостенного сосуда из нержавеющей стали, заключенного в термостат. Снизу пьезометр снабжен капилляром, через который открытием вентиля 4 пьезометр заполняют исследуемой жидкостью при комнатной температуре и атмосферном давлении. При нагревании пьезометра, когда давление повышается, жидкость последовательно выпускают небольшими порциями в сосуд 5, что позволяет поддерживать заданное давление. Массу каждой выпущенной порции жидкости определяют взвешивани-

ем. Очевидно, что начальная масса  $M$  равна сумме всех порций, выпущенных при полном опорожнении пьезометра. Тогда плотность при различных температурах вычисляют из соотношения

$$\rho_t = \frac{M - m}{V_t}, \quad (4-30)$$

где  $m$  — масса жидкости, выпущенной из пьезометра к моменту достижения заданного состояния (температуры, давления);  $V_t$  — вместимость пьезометра при данной температуре, определяемая по заранее найденной начальной вместимости (см. § 4-1).

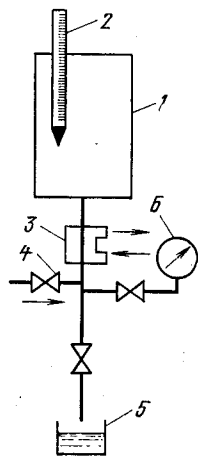


Рис. 4-8.

Рис. 4-8. Установка с жидкостным пьезометром постоянной вместимости.

1 — пьезометр; 2 — термометр сопротивления; 3 — холодильник; 4 — вентиль в линии от источника жидкости; 5 — сливной сосуд; 6 — манометр.

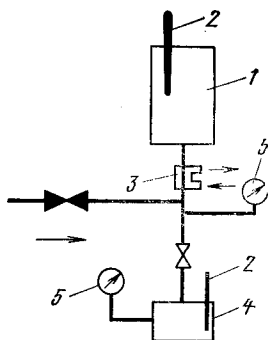


Рис. 4-9.

Рис. 4-9. Установка с газовым пьезометром постоянной вместимости. 1 — пьезометр; 2 — термометр; 3 — холодильник; 4 — сосуд низкого давления; 5 — манометры.

Массу  $M$  можно найти также как произведение начальной вместимости пьезометра на начальную плотность жидкости, если она известна или специально измерена каким-либо точным методом.

При расчете по уравнению (4-30) необходимо вводить поправки на количество жидкости, находящейся в так называемом балластном объеме, где температура отличается от температуры основной массы жидкости.

На рис. 4-8 таким балластным объемом является капилляр, соединяющий пьезометр с системой измерения давления. Подробно введение соответствующих поправок рассмотрено в работах [59, 74]. Существуют и так называемые безбалластные пьезометры постоянной вместимости, в которых все исследуемое вещество находится при температуре опыта, что достигается установкой на линии пьезометр — манометр «горячего» вентиля или мембраны, отделяющей вещество от масляной системы манометра, а также применением ртутного затвора [74, 150].

Погрешность измерений плотности жидкости пьезометрами постоянной вместимости оценивается в  $\pm (0,2 - 0,4)\%$  [12, 68].

Показанная на рис. 4-8 установка с пьезометром постоянной вместимости пригодна также для работы с газами и парами, которые при комнатных условиях находятся в жидком состоянии. Для газов, не конденсирующихся при комнатных условиях, в схеме установки несколько изменится устройство определения количества вещества, выпущенного из пьезометра. Один из способов состоит в том, что газ при низком давлении (близком к атмосферному) собирают в сосуде 4 (рис. 4-9), объем которого известен. Если измерить давление и температуру в этом сосуде, то, с помощью таблицы плотности этого газа при низких давлениях и температурах можно определить соответствующую плотность. Используя это значение плотности, по формуле (В-1) вычисляют массу газа, выпущенного в сосуд низкого давления, и далее определяют плотность газа при параметрах опыта. Если в сосуд низкого давления за один раз выпускают все количество газа, находящегося в пьезометре, то искомая плотность газа при параметрах опыта

$$\rho = \frac{V_1}{V} \rho_1,$$

где  $V$  — вместимость пьезометра;  $V_1$  — вместимость сосуда низкого давления;  $\rho_1$  — плотность газа при низком давлении.

Как видим, в этом случае измерения проводят относительным методом, т. е. необходимо знать плотность газа при низких давлениях и температурах. Очевидно, что точность измеренной плотности полностью зависит от точности исходного значения плотности газа, по которому рассчитывается масса газа в пьезометре.

С этой точки зрения более совершенными являются установки, в которых масса газа, заполняющего пьезометр, определяется непосредственным взвешиванием наполненного и пустого пьезометра [17]. Погрешность измерения на таких установках составляет  $\pm 0,2\%$ .

Пьезометры постоянной вместимости применяют также для измерения плотности паров, в том числе водяного пара. Масса исследуемого перегретого пара определяется количеством введенной в пьезометр воды. Изменяя давление и температуру, находят плотность пара при разных его состояниях. Погрешность измерения составляет около  $\pm 0,1\%$  [74].

Так как вместимость пьезометров изменяется в зависимости от давления и температуры, то при пользовании ими вводят поправки, которые вычисляют по соответствующим уравнениям. Однако точность расчетных поправок невысокая, поэтому для получения надежных результатов пьезометры калибруют в условиях опытов, т. е. при требуемых значениях давления и температуры. Вместе с тем существуют методы измерения, позволяющие исключить и введение поправок, и калибровку, что особенно важно при очень высоких давлениях и температурах. К ним относится, в частности, метод вытеснения [163]. Пьезометр постоянной вместимости наполняют газом при определенных значениях давления и температуры, выпускают в калиброванные сосуды и измеряют его количество. Затем опыт повторяют с вставленным в пьезометр металлическим вкладышем, объем которого известен для нормальных условий, а для условий

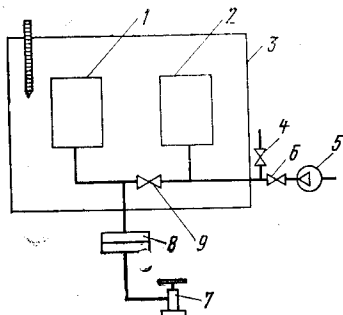


Рис. 4-10. Установка для измерений по методу последовательных расширений.

опыта может быть точно рассчитан. Измерение плотности сводится к измерению количества газа, вытесненного из пьезометра вкладышем, причем нет необходимости знать вместимость пьезометра.

Аналогичными преимуществами обладает метод последовательных расширений [59]. Схема установки для измерений этим методом дана на рис. 4-10. Предварительно вакуумированные пьезометры 1 и 2 заполняют исследуемым газом через вентиль 4, закрывают

вентиль 9 и с помощью вакуум-насоса 5 создают глубокий вакуум в пьезометре 2. В термостате 3 устанавливают определенную температуру, которую поддерживают в дальнейшем в течение всего опыта. По достижении равновесного состояния газа в пьезометре 1 измеряют его давление  $P_0$  дифманометром 8 и грузопоршневым манометром 7. Затем при закрытых вентилях 4 и 6 открывают вентиль 9, и газ из пьезометра 1 заполнит и пьезометр 2. Установившееся при этом давление обозначим  $P_1$ . Так как масса  $m_1$  газа осталась постоянной, то для обоих его состояний на основании выражения (В-12), введя обозначение

$$z = \frac{P}{\rho RT}, \quad (4-31)$$

можно записать:

$$P_0 V_1 = m_1 z_0 RT; \\ P_1 (V_1 + V_2) = m_1 z_1 RT,$$

где  $V_1, V_2$  — вместимости пьезометров 1 и 2. Обозначив постоянную  $N = (V_1 + V_2)/V_1$ , получим:

$$\frac{P_0}{z_0} = \frac{P_1}{z_1} N. \quad (4-32)$$

Далее опыт продолжают в том же порядке: закрывают вентиль 9, вакуумируют пьезометр 2; открыв вентиль 2, расширяют газ в пьезометре 1 и измеряют его давление. Процесс продолжают, пока давление газа не станет достаточно малым. Тогда для  $n$ -го цикла расширений имеем:

$$\frac{P_{n-1}}{P_n} = N \frac{z_{n-1}}{z_n}; \quad (4-33)$$

$$\frac{P_0}{z_0} = \frac{P_n}{z_n} N^n. \quad (4-33a)$$

В пределе ( $P \rightarrow 0$ ) коэффициент  $z \rightarrow 1$ , т. е.

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{P_{n-1}}{P_n} = N.$$

Следовательно, постоянную  $N$  можно определить графически, проведя кривую в координатах  $P_{n-1}/P_n, P_n$  через экспериментально найденные точки и экстраполируя ее до давления  $P_n = 0$ .

Аналогично для выражения (4-33a) получим:

$$\lim_{P \rightarrow 0} P_n N^n = \frac{P_0}{z_0}. \quad (4-34)$$

Таким образом, экстраполируя график  $P_n N^n = f(P_n)$  до нулевого давления, находят значение  $P_0/z_0$  и, следовательно,  $z_0$ . Коэффициенты  $z$  при других давлениях вычисляют по уравнению (4-33). Из выражения (4-31) находят значения плотности при разных давлениях. Как видно из изложенного, при этом методе не требуется знать вместимость пьезометров и количество исследуемого газа, следует произвести лишь последовательные измерения давлений.

В пьезометрах переменной вместимости изменение объема исследуемой жидкости, масса которой известна, можно фиксировать различными способами. На рис. 4-11 показана схема установки с пьезометром, оснащенным электроконтактным устройством. Внутри сосуда высокого давления 1 установлен стакан 4 со ртутью, в которую погружена нижняя часть пьезометра 2 с капилляром.

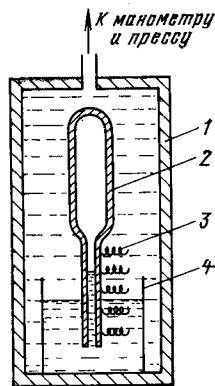


Рис. 4-11. Жидкостный пьезометр переменной вместимости.

В капилляр впаяны платиновые контакты 3, которые вне сосуда соединены с электросхемой, содержащей аккумуляторную батарею, магазин резисторов и гальванометр. Капилляр предварительно калибруют, определяя вместимость между каждой парой контактов по массе заполняющей капилляр ртути. Исходную вместимость пьезометра также определяют заранее.

После заполнения пьезометра исследуемой жидкостью при известных начальных условиях повышают давление вспомогательной жидкости в сосуде, которая при этом вытесняет часть ртути из стакана в капилляр. В момент прохождения уровнем ртути контакта сопротивление цепи резко уменьшится, а сила тока увеличится, так как ток пойдет через ртуть. Изменение показания гальванометра соответствует определенному изменению объема исследуемой жидкости в капилляре. Основной недостаток этого пьезометра связан с контактированием ртути с жидкостью, что ограничивает его использование с точки зрения температурного интервала.

Второй способ измерения изменения объема исследуемой жидкости основан на регистрации перемещения поршня, передающего давление испытываемой жидкости либо непосредственно, либо через промежуточную среду (ртуть). Поршень плотно пригнан к цилиндру, и его положение фиксируют с помощью реохордного датчика перемещений или нониусно-микрометрического устройства [230]. Существуют также пьезометры с неуплотненным поршнем; они рассчитаны на давление до 30 000 кгс/см<sup>3</sup> (3000 МПа) [84].

Более совершенны сифонные пьезометры: исследуемая жидкость с известной массой вводится внутрь вертикального сифона, помещенного в аппарат высокого давления. Под действием гидростатического давления нагнетаемой в аппарат жидкости герметично закрытый сифон сжимается до тех пор, пока давление внутри него не станет равным внешнему давлению. Изменение вместимости сифона пропорционально изменению его длины. Длину сифона измеряют при помощи реохордного или дифференциально-трансформаторного датчика перемещений, сердечник которого соединен с подвижным доньшком сифона. Подобные пьезометры дают погрешность до  $\pm 0,4\%$  и рассчитаны на давление до 10 000 кгс/см<sup>2</sup> (1000 МПа) [11] и температуру до 1300 К [209].

С различными конструкциями пьезометров можно ознакомиться в работах [59, 68, 74].

Показанная на рис. 4-11 схема применима и для газов, но пьезометр выполняется в виде ряда расположенных один над другим пустотелых шаров с уменьшающейся сверху вместимостью, соединенных между собой капиллярами, в которые впаяны платиновые контакты. Применяют также сифонные и поршневые пьезометры.

Описание различных установок с пьезометрами можно найти в работах [74, 110, 163, 174].

#### 4-4. ОБЪЕМОМЕРЫ

Как уже отмечалось, объемомеры для твердых тел бывают жидкостные и газовые. Наиболее простыми жидкостными объемомерами являются измерительные цилиндры, бюретки, мензурки, микробюретки и другие сосуды, позволяющие измерять объем жидкости в них. Испытуемое тело (или пробу вещества) после взвешивания на весах необходимой грузоподъемности и точности [62] погружают в соответствующую подобранную жидкость, налитую в указанный выше мерный сосуд. Шкала на сосуде градуируется в единицах объема или в единицах длины; во втором случае необходима калибровка для определения цены деления шкалы в единицах объема. Объем испытуемого тела находят по объему вытесненной им жидкости внутри сосуда. В микробюретках, применяемых для измерения плотности весьма малых проб вещества, изменение уровня жидкости фикси-

руют при помощи микроскопа или катетометра (подробнее см. [64]).

В качестве рабочей жидкости объемомера применяют воду, этиловый спирт, ксилол, ртуть и др. Жидкость должна обладать хорошей смачивающей способностью, т. е. малым поверхностным натяжением.

По найденным значениям массы и объема тела непосредственно вычисляют искомую плотность.

Существуют также жидкостные объемомеры, в которых объем тела устанавливается по объему жидкости, вытесненной из сосуда, причем этот объем жидкости измеряют либо непосредственно, либо путем взвешивания.

К числу общих достоинств жидкостных объемомеров относятся простота и скорость измерения плотности. В ряде случаев, в особенности в полевых условиях, они незаменимы при исследовании пористых и тонкозернистых веществ. Однако эти приборы значительно уступают по точности пикнометрам и гидростатическим весам. Следует заметить, что точность измерений тем выше, чем больше объем испытуемого тела.

Газовые объемомеры в основном находят применение при измерении плотности сыпучих и пористых тел, а также веществ, не допускающих смачивания жидкостью (например, хлопковые волокна, древесная стружка). Эти объемомеры снабжены герметизированным сосудом постоянной вместимости, куда вводят испытуемое тело и подают какой-либо газ, например, воздух; изменение абсолютного давления газа служит мерой плотности тела. При изотермическом процессе изменения объема газа на основании закона Бойля—Мариотта можно записать следующее выражение для вычисления плотности  $\rho$  тела:

$$\rho = \frac{MP_2}{V(P_2 - P_1)}, \quad (4-35)$$

где  $M$  — масса тела;  $V$  — вместимость сосуда;  $P_1, P_2$  — абсолютное давление газа до и после введения тела в сосуд.

Другая разновидность газового объемомера основана на том, что при смешении двух газов, имеющих различные объемы  $V_1$  и  $V_2$  и давления  $P_1$  и  $P_2$ , получается смесь с объемом  $V_0$  и давлением  $P_0$ , при этом

$$V_0 P_0 = V_1 P_1 + V_2 P_2. \quad (4-36)$$

В сосуд 1 прибора, изображенного на рис. 4-12, закладывают испытуемое тело объемом  $V_T$  и при помощи вакуум-насоса удаляют через кран 2 при открытом кране 3 некоторое количество воздуха, вследствие чего жидкость в манометре 4 поднимается на высоту  $h$ . Следовательно, давление внутри прибора равно  $B - B'$ , где  $B$  — атмосферное давление,  $B'$  — давление, эквивалентное высоте  $h$ . Закрыв кран 3, открывают кран 2, вследствие чего в полости объемом  $V_{TP}$  трубок тройника между кранами 2 и 3 и поверхностью жидкости в трубке 4 создается атмосферное давление  $B$  и жидкость опускается до исходной высоты.

В результате получаются две полости с воздухом объемом  $V - V_T$  (где  $V$  — вместимость сосуда) при давлении  $B - B'$  и объемом  $V_{TP}$  в тройнике при давлении  $B$ . Если затем закрыть кран 2 и открыть кран 3, то в системе установится давление  $B - B_1$ , где  $B_1$  — давление, эквивалентное высоте  $h_1$  поднятия жидкости в манометре, и воздух займет объем

$$V_2 = V + V_{TP} - V_T - h_1 \frac{\pi d^2}{4},$$

где  $d$  — диаметр трубки манометра.

На основании закона Бойля—Мариотта запишем:

$$V_2 (B - B_1) = (V - V_T) (B - B') + V_{TP} B,$$

откуда получаем выражение для определения объема тела

$$V_2 = V - \frac{V_{TP} B_1}{B' - B_1} - \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{h_1 (B - B_1)}{B' - B_1}. \quad (4-37)$$

Погрешность рассмотренных газовых объемомеров, как правило, значительна и достигает нескольких процентов, так как, во-первых, обеспечить требуемый изотермический процесс невозможно и, во-вторых, расчеты ведутся по закону идеального газа.

Схема измерений в газовом объемомере может быть видоизменена таким образом, что давление в системе поддерживают постоянным и искомый объем тела определяют по изменению количества газа [253]. Такой

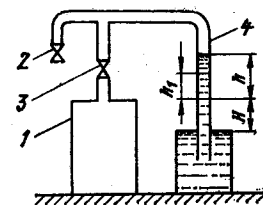


Рис. 4-12. Газовый объемомер.

объемомер дает хорошие результаты измерений плотности пористых тел при высоких температурах.

Этот принцип дает существенный эффект в повышении точности измерений при использовании двухкамерных газовых объемомеров, показания которых не зависят от давления и температуры [149, 237]. Погрешность двухкамерных объемомеров снижена до  $\pm (0,05-0,10) \%$ . Прибор выполнен в виде двух горизонтальных герметичных цилиндров одинаковых размеров, в которых перемещаются уплотненные поршни (рис. 4-13). К обоим цилиндрам, один из которых является измерительным, а другой — сравнительным, подключен в качестве нуль-индикатора высокочувствительный дифференциальный манометр. Когда оба поршня занимают положение I, манометр при открытом уравнительном вентиле показывает нуль. После перекрытия вентиля и введения испытуемого тела в цилиндр

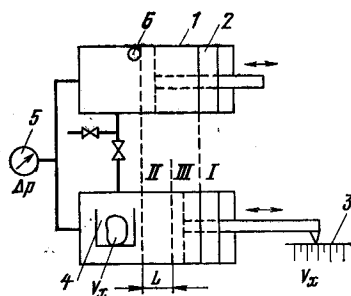


Рис. 4-13. Двухкамерный газовый объемомер.

1 — цилиндр; 2 — поршень; 3 — шкала или цифровой счетчик; 4 — сосуд с испытуемым телом; 5 — дифференциальный манометр; 6 — упор.

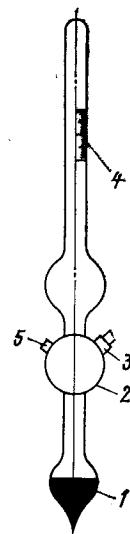
переместится на значение, равное объему тела. Если поршень в сравнительном цилиндре переместить в положение II, то для получения равных давлений поршень в измерительном цилиндре должен занять положение III на расстоянии  $L$  от положения II, соответствующем объему тела  $V_x$ . Искомый объем отсчитывают по шкале или счетчику, связанному с приводным механизмом поршня измерительного цилиндра. Градуировку прибора производят по контрольным телам известного объема. С результатами исследований двухкамерных объемомеров можно ознакомиться в работах [113, 149, 237].

#### 4-5. АРЕОПИКНОМЕТРЫ

При исследовании жидкости, имеющейся в малом количестве (например, при анализе крови и т. п.), определенными преимуществами обладает разновидность пикнометра, называемая ареопикнометром. Ареопикнометр (рис. 4-14) представляет собой сочетание пикнометра со

Рис. 4-14. Ареопикнометр.

1 — балластная камера; 2 — пикнометр; 3 — штуцер с притертой пробкой; 4 — шкала; 5 — уравновешивающий пружин.



стеклянным ареометром постоянной массы: нижняя часть корпуса ареометра над балластной камерой 1 выполнена в виде пикнометра 2 небольшого объема с боковым штуцером 3, в котором предусмотрено отверстие для заполнения исследуемой жидкостью. Отверстие закрывается притертой стеклянной пробкой. Ареопикнометр погружают во вспомогательную жидкость известной плотности (обычно в дистиллированную воду), и глубина его погружения зависит от плотности исследуемой жидкости, которую отсчитывают по шкале 4, нанесенной на стержне. Шкалу градуируют таким образом, что при заполнении пикнометра дистиллированной водой той же температуры показание по шкале равно единице.

В отличие от обычного ареометра у ареопикнометра показания по шкале растут снизу вверх. Для расширения диапазона измерений одним прибором балластная камера может быть снабжена снизу крючком, на который навешивают дополнительные грузы в виде гирек с петлей.

Для расчета основных размеров ареопикнометра составим уравнения его равновесия в дистиллированной воде при заполнении соответственно водой ( $\rho_B$ ) и испытуемой жидкостью, которая ( $\rho$ ) тяжелее воды, при температуре  $t$ :

$$M + V\rho_B = (V_0 + V)\rho_B;$$

$$M + V\rho = (V_0 + V + nv)\rho_B,$$

где  $M$  — масса пустого прибора;  $V$  — вместимость пикнометра;  $V_0$  — вместимость прибора за вычетом вместимости пикнометра;  $v$  — объем стержня, соответствующий цене деления шкалы;  $n$  — число делений, на которое погружается прибор с жидкостью.

Решая совместно эти уравнения, получаем:

$$\rho = \left(1 + \frac{nv}{V}\right) \rho_B. \quad (4-38)$$

Задаваясь диапазоном измерений  $\Delta\rho = \rho - \rho_v$  и ценой деления шкалы  $\Delta\rho/n$ , из уравнения (4-38) легко определяют требуемое соотношение  $v/V \approx \Delta\rho/n$ .

Аналогично рассчитывают ареопикнометр для жидкостей, которые легче воды.

Ареопикнометр более точен, чем ареометр постоянной массы, так как его показания не зависят от капиллярных свойств и летучести исследуемой жидкости. Кроме того, ареопикнометр позволяет обходиться весьма малым количеством жидкости. Однако для массовых измерений при наличии требуемого количества жидкости более целесообразно пользоваться ареометрами, учитывая их простоту и достаточную точность.

Другая модификация ареопикнометра под названием «ареометр АГ-ЗПП» предназначена для измерения плотности глинистых и цементных растворов, применяемых при бурении нефтяных и газовых скважин [7, 132]. Прибор, выполненный из пластмассы (полиэтилена), состоит из мерного стакана, который сверху закрывается ввинчиваемым в него основанием корпуса ареометра. На стержне ареометра нанесены две шкалы плотности с пределами соответственно 0,9—1,7 и 1,6—2,4 г/см<sup>3</sup>, при использовании первой шкалы к стакану снизу прикрепляют калиброванный груз массой 76 г.

Стакан заполняют исследуемой жидкостью; постоянство ее объема обеспечивается тем, что излишек принудительно удаляется при ввинчивании ареометра в стакан. После погружения прибора в сосуд показание отсчитывают по месту пересечения поверхности воды со шкалой.

Так как прибор градуируют по дистиллированной воде, а при измерениях применяют другую воду, то необходимо вводить поправку на плотность воды. Эту поправку определяют по специальной (третьей) шкале и добавляют к показанию по шкале плотности.

Объем пробы раствора 78,5 см<sup>3</sup>. Предельная погрешность  $\pm 0,02$  г/см<sup>3</sup>.

#### 4-6. АДсорбционные Плотномеры

К объемно-весовым плотномерам относятся также адсорбционные приборы. На рис. 4-15 приведена принципиальная схема адсорбционного плотномера для измерения плотности пара [74]. В сосуде 1 находится жидкость, плотность пара которой требуется опре-

делить. Сосуд помещен в термостат 11, в котором поддерживается определенная температура. Давление пара измеряют U-образным манометром. В термостате 10 находится баллон 9, вместимость которого известна. К спирали кварцевых торсионных весов 7 подвешена чашка с некоторым количеством адсорбента. В качестве адсорбента применяют активированный уголь или силикагель. Перед опытом в баллоне и весах вакуум-насосом создают разрежение до  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  мм рт. ст., при этом краны 4, 6 и 8 открыты. Затем кран 4 закрывают и открывают кран 3. В течение некоторого промежутка времени устанавливается равновесие между паром, проникшим в баллон, и жидкостью, находящейся в сосуде. Температуру в термостате 10 поддерживают более высокой (не менее чем на

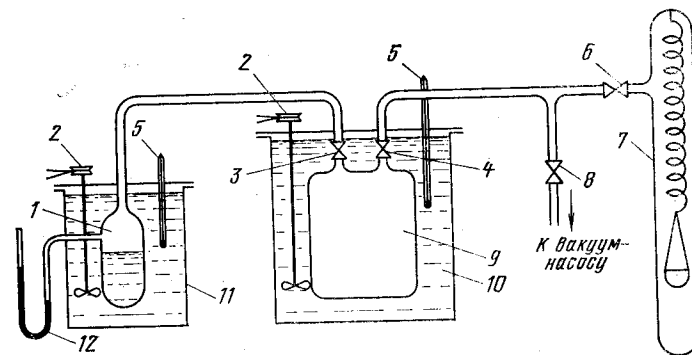


Рис. 4-15. Адсорбционный плотномер.

1 — сосуд; 2 — мешалка; 3, 4, 6, 8 — краны; 5 — термометр; 7 — торсионные весы; 9 — баллон; 10, 11 — термостаты; 12 — манометр.

5—10°C), чем в термостате 2, во избежание адсорбции насыщенного пара стенками баллона. Затем краны 3 и 8 закрывают. Открыв краны 4 и 6, соединяют баллон с весами. Нижняя часть весов при этом охлаждается. Через некоторое время (обычно 10—15 мин) пар, находящийся в баллоне, поглощается адсорбентом. Показание весов фиксируют катетометром и тем самым определяют массу  $M$  поглощенного пара. Тогда искомая его плотность при температуре  $t$  в термостате 10 и давлении  $P$  в сосуде 1 составит  $\rho = M/V$ , где  $V$  — вместимость баллона.

После измерения нижнюю часть весов прогревают до 200—250°C в течение 10—15 мин и при закрытом кране 4, открытых кранах 6 и 8 удаляют вакуум-насосом пар из адсорбента. Пар конденсируется в ловушке вакуум-насоса.

Погрешность адсорбционного плотномера до  $\pm 0,1\%$ . Его можно применять также для измерения плотности газов, причем при повышенных давлениях и температурах.



## ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПЛТНОМЕРЫ

### 5-1. ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ ПЛТНОМЕРЫ

Гидростатический метод измерения плотности жидкости основан на зависимости гидростатического давления  $P$  столба жидкости высотой  $H$  от плотности  $\rho$  жидкости. Эта зависимость определяется формулой

$$P = \rho g H. \quad (5-1)$$

Следовательно, по результатам измерения высоты и давления столба жидкости легко определить плотность этой жидкости. Таким способом были, например, измерены плотности расплавленных неорганических солей (температура до 500°C) с погрешностью  $\pm 0,05\%$  [225]. Жидкость находилась в термостатированной U-образной трубке с капиллярами в коленах, и в одно ее колено подавали под давлением газ до того момента, когда уровень в другом колене доходил до метки. Искомую плотность жидкости, учитывая выражение (5-1), вычисляли по уравнению

$$\rho = \frac{M}{V_0} - \frac{S}{V_0 g} P, \quad (5-2)$$

где  $M$  — масса жидкости;  $V_0$  — вместимость трубки до метки (определяется при градуировке);  $S$  — площадь поперечного сечения отверстия трубки.

Таким образом, давление газа, измеряемое жидкостным манометром, служит мерой плотности испытуемой жидкости.

Удобно пользоваться дифференциальной схемой, для чего в двух U-образных трубках одинакового диаметра, в одну из которых налита испытуемая жидкость плотностью  $\rho$ , а в другую — жидкость (контрольная) с известной плотностью  $\rho_k$ , одновременно создают (например, при помощи резиновой груши) некоторую разность давлений (рис. 5-1). Обозначая разность уровней жидкости в од-

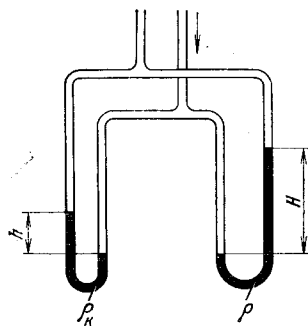


Рис. 5-1. Дифференциальный гидростатический плотномер для жидкости.

ной трубке  $H$ , а в другой —  $h$ , с учетом формулы (5-1) получаем:

$$\rho = \rho_k \frac{h}{H}. \quad (5-3)$$

Как видно из выражения (5-3), при такой схеме достаточно измерить (например, катетометром) величины  $H$  и  $h$ , т. е. нет необходимости знать давление и ускорение свободного падения, что, естественно, повышает точность измерений.

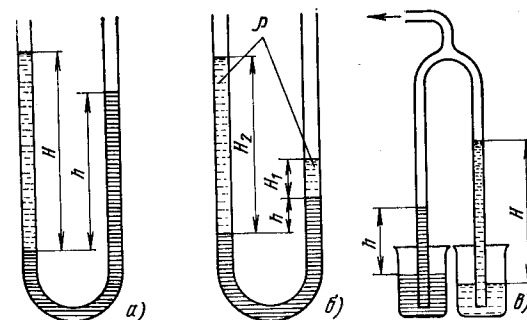


Рис. 5-2. U-образные гидростатические плотномеры для жидкостей.

Тот же эффект достигается, если в колена U-образной трубки налить обе жидкости — испытуемую и контрольную (при условии, что они не смешиваются). Так как в сообщающихся сосудах высоты столбов жидкостей над уровнем их раздела ( $H$  и  $h$  на рис. 5-2,а) обратно пропорциональны плотностям жидкостей, то и в этом случае справедлива формула (5-3). Для уменьшения влияния поверхностного натяжения рекомендуется более легкую жидкость наливать в оба колена, причем на разную высоту (рис. 5-2,б), тогда

$$\rho = \rho_k \frac{h}{H_2 - H_1}. \quad (5-4)$$

Если в качестве контрольной жидкости приходится пользоваться жидкостью, которая смешивается с испытуемой, то их помещают в отдельные сосуды, в которые затем погружают перевернутую U-образную трубку (рис. 5-2,в). При создании разрежения в верхней части

## ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПЛТНОМЕРЫ

### 5-1. ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ ПЛТНОМЕРЫ

Гидростатический метод измерения плотности жидкости основан на зависимости гидростатического давления  $P$  столба жидкости высотой  $H$  от плотности  $\rho$  жидкости. Эта зависимость определяется формулой

$$P = \rho g H. \quad (5-1)$$

Следовательно, по результатам измерения высоты и давления столба жидкости легко определить плотность этой жидкости. Таким способом были, например, измерены плотности расплавленных неорганических солей (температура до 500°C) с погрешностью  $\pm 0,05\%$  [225]. Жидкость находилась в термостатированной U-образной трубке с капиллярами в коленах, и в одно ее колено подавали под давлением газ до того момента, когда уровень в другом колене доходил до метки. Искомую плотность жидкости, учитывая выражение (5-1), вычисляли по уравнению

$$\rho = \frac{M}{V_0} - \frac{S}{V_0 g} P, \quad (5-2)$$

где  $M$  — масса жидкости;  $V_0$  — вместимость трубки до метки (определяется при градуировке);  $S$  — площадь поперечного сечения отверстия трубки.

Таким образом, давление газа, измеряемое жидкостным манометром, служит мерой плотности испытуемой жидкости.

Удобно пользоваться дифференциальной схемой, для чего в двух U-образных трубках одинакового диаметра, в одну из которых налита испытуемая жидкость плотностью  $\rho$ , а в другую — жидкость (контрольная) с известной плотностью  $\rho_k$ , одновременно создают (например, при помощи резиновой груши) некоторую разность давлений (рис. 5-1). Обозначая разность уровней жидкости в од-

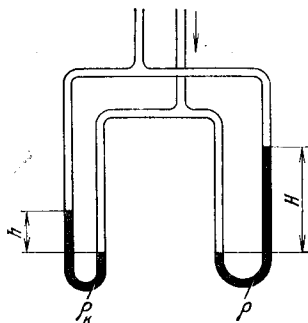


Рис. 5-1. Дифференциальный гидростатический плотномер для жидкости.

ной трубке  $H$ , а в другой —  $h$ , с учетом формулы (5-1) получаем:

$$\rho = \rho_k \frac{h}{H}. \quad (5-3)$$

Как видно из выражения (5-3), при такой схеме достаточно измерить (например, катетометром) величины  $H$  и  $h$ , т. е. нет необходимости знать давление и ускорение свободного падения, что, естественно, повышает точность измерений.

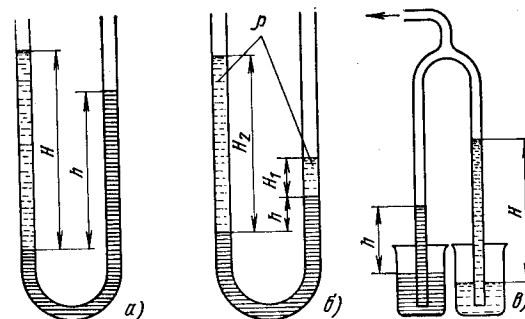


Рис. 5-2. U-образные гидростатические плотномеры для жидкостей.

Тот же эффект достигается, если в колена U-образной трубки налить обе жидкости — испытуемую и контрольную (при условии, что они не смешиваются). Так как в сообщающихся сосудах высоты столбов жидкостей над уровнем их раздела ( $H$  и  $h$  на рис. 5-2,а) обратно пропорциональны плотностям жидкостей, то и в этом случае справедлива формула (5-3). Для уменьшения влияния поверхностного натяжения рекомендуется более легкую жидкость наливать в оба колена, причем на разную высоту (рис. 5-2,б), тогда

$$\rho = \rho_k \frac{h}{H_2 - H_1}. \quad (5-4)$$

Если в качестве контрольной жидкости приходится пользоваться жидкостью, которая смешивается с испытуемой, то их помещают в отдельные сосуды, в которые затем погружают перевернутую U-образную трубку (рис. 5-2,в). При создании разрежения в верхней части

трубки (например, при помощи поршневого микронасоса) жидкости засасываются в оба колена так, что высоты столбов обратно пропорциональны плотностям в соответствии с формулой (5-2). Снабдив оба колена шкалами, по одной из них можно непосредственно отсчитать относительную плотность испытуемой жидкости [218].

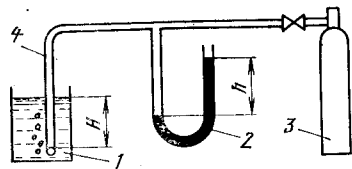


Рис. 5-3. Гидростатический плотномер с продувкой газа.

К гидростатическим плотномерам относится также прибор, принцип действия которого основан на измерении давления, необходимого для отрыва пузырька газа от кромки трубки, вертикально погруженной в испытуемую жидкость. Схема такого устройства показана на рис. 5-3. В сосуд 1 с жидкостью по трубке 4 подается из баллона 3 газ, не взаимодействующий с жидкостью, так, что он выходит из трубки отдельными пузырьками. Давление газа измеряют жидкостным манометром 2. Давление, которое преодолевает пузырек газа в момент отрыва от трубки, равно сумме гидростатического давления столба жидкости высотой  $H$ , совпадающей с глубиной погружения трубки, и давления в пузырьке, определяемого формулой (В-22). Тогда с учетом выражения (5-1) имеем следующее уравнение:

$$\rho g H + \frac{2\sigma}{R} = \rho_m g h, \quad (5-5)$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости на границе с газом;  $R$  — радиус пузырька;  $\rho_m$  — плотность манометрической жидкости.

Таким образом, при постоянной глубине погружения трубки высота уровня манометрической жидкости является мерой плотности исследуемой жидкости. Однако этот прибор обладает существенным недостатком, состоящим в том, что результат измерения зависит от поверхностного натяжения, которое, как уже отмечалось ранее, изменяется от ряда факторов. Кроме того, необходимо поддерживать постоянной глубину погружения трубки. Для исключения этих недостатков целесообразно пользоваться дифференциальным методом, погружая в жидкость на разную глубину одну и ту же трубку или одновременно две параллельно расположенные трубки

одинакового диаметра, подключенные к разным коленам манометра. Записав уравнение (5-5) для каждой трубки, получим следующее выражение для искомой плотности:

$$\rho = \frac{\Delta h}{\Delta H} \rho_m, \quad (5-6)$$

где  $\Delta h$  — разность уровней манометрической жидкости;  $\Delta H$  — расстояние между кромками трубок.

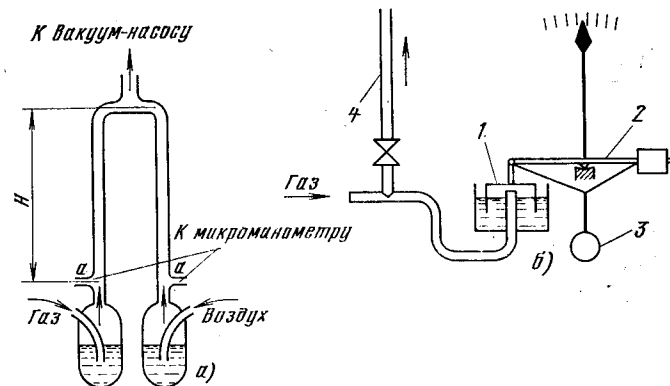


Рис. 5-4. Дифференциальные гидростатические плотномеры для газов.

Очевидно, что расстояние  $\Delta H$  является константой прибора, т. е. результат измерения плотности однозначно определяется показанием манометра. Дифференциальным способом широко пользуются для измерения плотности расплавов тугоплавких веществ [51, 169, 243]. Погрешность метода приблизительно  $\pm 0,2\%$ .

В гидростатических плотномерх для газов обычно измерения проводят относительным дифференциальным методом, сравнивая давления двух столбов газов (испытуемого и контрольного) одинаковой высоты, находящихся в одном и том же состоянии. Чаще всего контрольным газом служит воздух (рис. 5-4,а). Оба газа засасывают одновременно вакуум-насосом через водяной затвор и вертикальные трубки, причем с очень малой скоростью, так, чтобы газы успели насытиться водяными парами. Температуру обоих газов поддерживают одинаковой. Диаметр трубок должен быть достаточным (не менее 10 мм), чтобы не возникало со-

противление потоку, искажающее результат измерений. Учитывая малую плотность газов, длину трубок следует брать большой (несколько метров). На некотором уровне  $a$  — согласно выражению (5-1) создается разность давлений

$$\Delta P = Hg(\rho_t - D_t),$$

откуда искомая плотность газа

$$\rho_t = \frac{\Delta P}{Hg} + D_t. \quad (5-7)$$

Разность давлений измеряют высокочувствительным микроманометром (например, с наклонной трубкой), имеющим очень малый верхний предел измерений. Специально разработанный для этой цели микроманометр описан в [238]. В ряде случаев оказывается более удобной схема, показанная на рис. 5-4, б; газ подводят под колокол 1, погруженный в водяной затвор и подвешенный к коромыслу 2 весов. Груз 3 служит для регулирования чувствительности и пределов измерения, а трубка 4 — для выпуска газа. Усовершенствованный дифференциальный колокольный микроманометр для измерения плотности газа описан в [8].

## 5-2. СТРУЙНЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

При измерении плотности газов широко используют струйные (или так называемые эффузионные<sup>1</sup>) плотномеры, принцип действия которых основан на зависимости между плотностью газа и скоростью его истечения из отверстия. В соответствии с уравнением Бернулли скорость  $w$  течения газа или пара (плотностью  $\rho$ ) через отверстие с определенной степенью приближения можно выразить зависимостью [115]

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}, \quad (5-8)$$

где  $\Delta P$  — перепад давления в отверстии.

Если через отверстие поочередно пропустить одинаковые объемы двух газов и учесть уравнение неразрывности потока (постоянство произведения скорости на время и площадь поперечного сечения отверстия), то

из уравнения (5-8) при неизменном перепаде давления получим:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^2, \quad (5-9)$$

где  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  — время протекания соответственно первого и второго газов.

Таким образом, измерив время протекания одинаковых объемов двух газов через отверстие при неизменном перепаде давления, легко найти плотность одного газа по известной плотности другого.

В ряде случаев, особенно для паров при повышенных температурах, удобнее измерять массу протекшего газа, а не его объем, тогда уравнение (5-9) примет вид:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left( \frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^2 \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^2, \quad (5-10)$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  — масса газа (пара), протекшего через отверстие за время соответственно  $\tau_1$  и  $\tau_2$  при неизменном перепаде давления.

Измерения можно вести также при разных перепадах давлений; в этом случае в уравнениях (5-9) и (5-10) правую часть следует умножить соответственно на  $\Delta P_2/\Delta P_1$  и  $\Delta P_1/\Delta P_2$ .

Так как площадь сечения отверстия изменяется в зависимости от температуры, истечение обоих газов должно происходить по возможности при одинаковых температурах.

Выше было отмечено, что зависимость (5-8) приближенная. Это связано с тем, что в ней отсутствует множитель (коэффициент расхода), являющийся функцией числа Рейнольдса  $Re$ , в особенности при малых его значениях, имеющих место в эффузионных плотномерах с отверстием весьма малого диаметра. Частично этот недостаток можно устранить при конструировании прибора так, чтобы произведение скорости течения на диаметр отверстия, а следовательно, и число  $Re$  были достаточно большими, тогда коэффициент расхода перестает зависеть от  $Re$  (так называемая автомодельная область). Кроме того, вязкость газов может сильно различаться, что также влияет на число  $Re$ . В уравнении (5-8) не учтено и изменение плотности газа при прохождении через отверстие, обусловленное изменением давления (некоторой компенсацией этому является то, что в расчет принима-

<sup>1</sup> От английского слова effusion — истечение.

ют среднюю плотность газа в его состояниях перед и за отверстием).

Коэффициент расхода зависит также от формы и размеров отверстия, от сопротивления течению газа и других факторов. Экспериментальный подбор соответствующей формы отверстия позволяет добиться постоянства коэффициента расхода. Погрешность измерений эффузионным плотномером определяется его конструкцией и составляет около  $\pm 1\%$ .

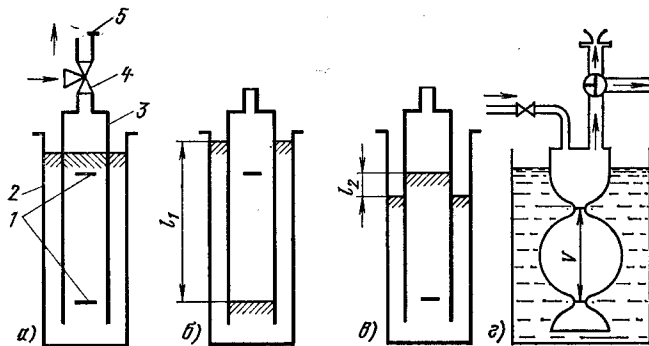


Рис. 5-5. Принципиальная схема струйного плотмера.

Принцип действия струйного (эффузионного) плотмера пояснен на рис. 5-5. Открытая снизу стеклянная трубка 3 (рис. 5-5,а) помещена в цилиндр 2 с жидкостью. На трубке нанесены две контрольные метки 1. Испытуемый газ через трехходовой кран 4 вводят в полость трубки над жидкостью при перекрытом отверстии 5 так, чтобы уровень жидкости опустился под нижнюю отметку. После открытия отверстия газ выходит из трубки и уровень жидкости в ней поднимается. В моменты прохождения жидкостью нижней (рис. 5-5,б) и верхней (рис. 5-5,в) меток соответственно включают и выключают секундомер, который и покажет время истечения газа. Избыточное давление в трубке в указанные моменты определяется уровнем жидкости  $l_1$  и  $l_2$ . В расчет вводят среднее значение давления.

В качестве затворной жидкости используют воду, малязкое масло или ртуть, а в качестве контрольного газа — воздух. Выпускным элементом прибора обычно

является диафрагма или сойло, выполненные в виде тонкой пластины с отверстием требуемой формы.

Для повышения точности измерения уровня жидкости рекомендуется зоны трубки, в которых находятся метки (рис. 5-5,з) делать суженными. Включение и выключение секундомера можно автоматизировать [18]. Например, если затворной жидкостью служит ртуть, то в трубку на уровнях меток впаивают платиновые контакты, которые включены в электрическую цепь секундомера [74].

Заполнение цилиндра жидкостью производят при помощи сосуда, соединенного с нижней частью цилиндра резиновым шлангом и установленного на штативе с регулируемой высотой.

Следует учитывать, что плотность, найденная по прибору, заполненному водой, соответствует влажному газу; для пересчета результата измерения на сухой газ, если контрольным газом был воздух, служит вытекающая из уравнения (В-14) формула, позволяющая вычислить плотность газа в нормальном состоянии, выраженную в  $\text{кг/м}^3$ :

$$\rho_n = 1,205 \left\{ \frac{\rho_t}{D_t} - 0,622 \frac{P_{в.п}}{P - P_{в.п}} \left( 1 - \frac{\rho_t}{D_t} \right) \right\}, \quad (5-11)$$

где  $P_{в.п}$  — давление насыщенного водяного пара при температуре  $t$ ;  $P = B + \Delta P_{ср}$ .

Время истечения воздуха и газа измеряют несколько раз, используя затем средние значения.

Существует несколько разновидностей усовершенствования схемы, показанной на рис. 5-5. Одна из них [105] содержит вместо трубки 3 тонкостенный колокол, который под действием собственного веса погружается в воду с постоянной скоростью, вытесняя при этом газ через диафрагму в патрубке на крыше колокола; давление под колоколом не меняется. Благодаря неизменной скорости истечения газа устраняется существенный недостаток схемы на рис. 5-5. Нагружая колокол грузом, можно менять скорость вытеснения газа. Ход колокола, а следовательно, и объем выходящего газа остаются неизменными. На колоколе предусмотрены упоры, которые включают и выключают переливное устройство, направляющее вытесняемую воду на весы. Таким образом, измерение времени истечения [см. уравнение (5-9)] заменено измерением массы вытесненной воды, что позволяет получить искомую плотность с погрешностью  $\pm 0,1\%$

Более надежные результаты обеспечивает двухколокольный плотномер [249], представляющий собой два одноколокольных прибора в едином корпусе. Один колокол 3 предназначен для работы с воздухом, другой 6 — с испытуемым газом (рис. 5-6). Форма, масса и вместимость колоколов одинаковы. На направляющих

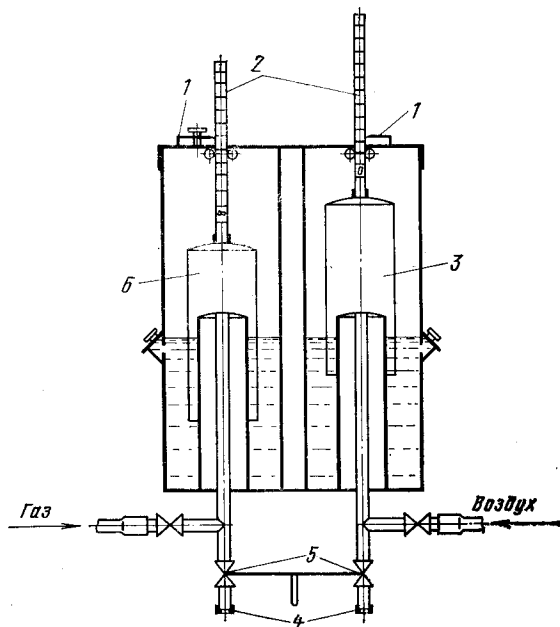


Рис. 5-6. Двухколокольный струйный плотномер.

колоколов укреплены шкальные линейки 2. Колокола, находящиеся в масляной ванне, заполняют осушенным газом и воздухом так, чтобы указатели 1 установились против одинаковых отметок внизу линеек. После открытия спаренных выпускных кранов 5 газ и воздух выйдут через сопла 4 с отверстиями одинакового диаметра. Как только колокол с более легким газом опустится до верхней отметки на шкале, краны закрывают и по шкале другого колокола непосредственно отсчитывают относительную плотность газа. Благодаря равенству размеров колоколов и времени истечения газов определение

относительной плотности сводится к измерению перемещений колоколов, т. е.

$$\rho_{от} = \frac{\rho_t}{D_t} = \left( \frac{H_{вз}}{H_t} \right)^2; \quad \rho_t < D_t, \quad (5-12)$$

где  $H_t$ ,  $H_{вз}$  — ход колокола соответственно с газом и воздухом, причем  $H_t = h$  ( $h$  — длина всей шкалы).

Таким образом, шкала получается квадратичной и охватывает пределы относительной плотности от 1 до 0 сверху вниз (на правом колоколе). При измерении плотности тяжелых газов ( $\rho_t > D_t$ ) базовым становится воздушный колокол, шкала на газовом (левом) колоколе градуируется от 1 до  $\infty$  по формуле (5-12), куда подставляют  $H_{вз} = h$ . Следовательно, в обоих случаях наблюдение ведут за быстро падающим колоколом, а показание отсчитывают по шкале медленно падающего колокола.

При построении шкал необходимо вводить поправку на разность выталкивающих сил, возникающую из-за различной глубины погружения колоколов. Глубина погружения всегда больше у быстрее движущегося (т. е. полностью опустившегося) колокола, следовательно, выталкивающая сила у него больше, а средняя скорость меньше, чем у частично опустившегося (медленно движущегося) колокола. Это приводит к тому, что показания шкалы 1—0 преувеличены (завышены), а шкалы 1— $\infty$  преуменьшены (занижены). Соответствующую поправку к длине хода колокола вычисляют по уравнению

$$\Delta H_t = h \left[ \frac{1 - \left( 1 - \frac{\Delta P}{P_0} \rho^{1/2} \right)^{3/2}}{1 - \left( 1 - \frac{\Delta P}{P_0} \right)^{3/2}} - \rho^{1/2} \right], \quad (5-13)$$

где  $P_0$  — давление под колоколом в исходном положении;  $\Delta P$  — падение давления при перемещении в крайнее нижнее положение;  $\rho = \rho_{от}$  при  $\rho_t < D_t$  и  $\rho = 1/\rho_{от}$  при  $\rho_t > D_t$ .

Так как согласно выражению (5-12) для частично опустившегося колокола  $H = h \rho_{от}^{1/2}$ , то поправка к плотности

$$\Delta \rho_{от} = \frac{2 \Delta H}{h} \rho_{от}^{1/2}, \quad (5-14)$$

откуда относительная погрешность от пренебрежения этой поправкой, выраженная в процентах,

$$\delta \rho_{от} = \frac{200 \Delta H}{h \rho_{от}^{1/2}} \quad (5-15)$$

Из уравнения (5-13) видно, что в точке  $\rho_{от}=1$  поправка  $\Delta H=0$ . Расчеты по уравнению (5-15) показывают, что пренебрежение поправкой дает погрешность до 3% при малой плотности газа. Если же шкала градуирована с учетом поправки по уравнению (5-13), то погрешность измерения плотности составляет примерно  $\pm 0,5\%$ .

Достоинства двухколокольного плотномера состоят в упрощении и ускорении измерений, не требуется измерять время и производить пересчет на сухое состояние, облегчаются поверка и настройка прибора: оба колокола, заполненные воздухом, в результате его истечения через сопла, должны одновременно пройти вдоль всей шкалы; если же наблюдаются отклонения, то их можно устранить изменением массы колоколов.

К рассмотренным плотномерам примыкает также группа приборов, основанных на использовании турбулентных дросселей и струйных элементов, которые образуют перспективное направление развития приборостроения. Подробнее с этим вопросом можно ознакомиться в [54].

### 5-3. СКОРОСТНЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

При измерении плотности весьма малых проб жидкости используют капельный метод, основанный на том, что скорость падения капли жидкости в другой, не смешивающейся с ней жидкости меньшей плотности увеличивается с ростом плотности испытуемой жидкости.

В первом приближении падение сферической капли подчиняется закону Стокса:

$$\omega = \frac{g d^2 (\rho - \rho_k)}{18 \eta} \quad (5-16)$$

где  $\omega$  — установившаяся скорость падения капли, см/с;  $d$  — диаметр капли, см;  $\rho$ ,  $\rho_k$  — плотность испытуемой и контрольной жидкостей, г/см<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>;  $\eta$  — динамическая вязкость контрольной жидкости, П.

Так как  $\omega = L/t$ , где  $t$  — время прохождения капель фиксированного расстояния  $L$ , то, вводя обозначения

$$c_1 = -\frac{g d^2 \rho_k}{18 \eta L}; \quad c_2 = \frac{g d^2}{18 \eta L},$$

из (5-16) получаем:

$$\frac{1}{t} = c_1 + c_2 \rho. \quad (5-17)$$

Из уравнения (5-17) следует, что если диаметр капли, плотность и вязкость среды, в которой падает капля, остаются постоянными и, следовательно, коэффициенты  $c_1$  и  $c_2$  также имеют постоянное значение, а падение капли подчиняется закону Стокса, то должна существовать линейная зависимость между обратной величиной времени падения и плотностью испытуемой жидкости. Однако, как показывает опыт, кривая, построенная в координатах  $\frac{1}{t}$ ,  $\rho$ , не

является прямой линией, а имеет небольшой изгиб [63]. Отклонение от линейной зависимости тем больше, чем больше скорость падения капли, т. е. чем сильнее нарушение сферической формы капли.

Изгиб кривой свидетельствует о том, что падение капли в жидкости не подчиняется закону Стокса. Это связано с тем, что закон Стокса выведен при определенных допущениях, причем некоторые из них оказываются несправедливыми для рассматриваемого случая. Так, например, при выводе закона Стокса принимают, что стенки сосуда, в котором падает капля, находятся на бесконечно большом расстоянии друг от друга, и тем самым исключают влияние стенок сосуда на падение капли. Считают далее, что вязкость капли должна быть очень большой с тем, чтобы в процессе падения ее поверхностный слой оставался неподвижным. Кроме того, принимают, что скорость падения капли не превышает критической величины, определяемой числом Рейнольдса. Практически при определении плотности капельным методом указанные условия не соблюдаются и, следовательно, падение капли лишь приблизительно описывается уравнением Стокса. Это означает, что если даже время падения капли точно измерено и остальные величины, входящие в выражение (5-17), известны, то плотность  $\rho$  не может быть надежно определена. Поэтому при измерении плотности капельным методом приходится пользоваться градуировочной кривой, построенной эмпирически измерением времени падения капель жидкости с известной плотностью.

Однако падение капли в жидкости качественно правильно описывается законом Стокса, из которого следует, что время падения капли прямо пропорционально вязкости контрольной жидкости, обратно пропорционально квадрату диаметра капли и разности плотностей обеих жидкостей. Действительно, по экспериментальным данным зависимость времени падения от разности  $\rho - \rho_k$  выражается кривой, близкой к гиперболе.

Таким образом, измеряя время падения капли между двумя метками, нанесенными на известном расстоянии друг от друга на стенке цилиндра с контрольной жидкостью, определяют плотность испытуемой жидкости. При этом для образования капель правиль-

ной формы и постоянного размера применяют специальные микропипетки (микрокапельницы) [63]. Обычно используют капли объемом 6—10 мм<sup>3</sup>. Работать с каплями меньшего размера неудобно, так как на время их падения влияют даже небольшие конвекционные токи в жидкости, а также незначительная вибрация измерительной установки. Использование капель большого размера снижает чувствительность измерений в связи с уменьшением времени их падения при данной разности плотностей капли и жидкости.

Требование к контрольной жидкости для обеспечения необходимой точности и надежности измерений сводится к следующему: испытываемая и контрольная жидкости не должны химически взаимодействовать или растворяться одна в другой; контрольная жидкость должна обладать малой вязкостью, а ее плотность быть немного меньше плотности испытываемой жидкости, причем вязкость и плотность не должны изменяться во времени. Если используется смесь жидкостей, то они должны обладать малой и близкой упругостью пара (в противном случае частичное испарение компонентов смеси приведет к изменению состава жидкости). Характеристики некоторых жидкостей и смесей, которые могут быть применены в качестве контрольной жидкости, приведены в [63].

Термостатирование должно осуществляться с погрешностью порядка  $\pm 0,003^\circ\text{C}$ .

Скорость падения капли возрастает по мере увеличения диаметра цилиндра, что связано с тормозящим влиянием стенок на движение капли. Поэтому градуировочной кривой можно пользоваться только для цилиндра, с которым была проведена градуировка. Но влияние стенок в узких цилиндрах сказывается не только на времени падения капли. Оно приводит также к тому, что капля направляется по оси цилиндра и падает по кратчайшему пути. При свободном же падении капли в широком цилиндре капля легко отклоняется от прямого пути и время падения может не воспроизвестись. Поэтому наиболее удобны цилиндры с внутренним диаметром 8—9 мм и длиной 450 мм (емкостью приблизительно 20 см<sup>3</sup>). На цилиндре наносят две кольцевые метки для отсчета времени падения. Верхнюю метку располагают на таком расстоянии от верхнего края, которое обеспечивает выравнивание температуры капли и среды и установление равномерного движения капли (обычно для этого достаточно 15—20 см).

Особое внимание следует уделять строго вертикальной установке цилиндра. Время падения капли измеряют секундомером<sup>1</sup> с погрешностью  $\pm (0,1—0,2)$  с. Измерения повторяют 5—6 раз и определяют среднее значение. Капельный метод может обеспечить измерения плотности с погрешностью  $\pm (0,001—0,05)$  %.

Применение описанного капельно-скоростного плотномера имеет ряд ограничений:

диапазон измерений в одной жидкости невелик — разность плотностей капли и жидкости не должна превышать 0,05 г/см<sup>3</sup>, поэтому для исследования группы различных жидкостей потребуется приготовить и опробовать много контрольных жидкостей;

могут встретиться трудности при подыскании жидкости, удовлетворяющей изложенным выше требованиям и достаточно близкой к испытываемой жидкости по плотности;

для уменьшения влияния конвекционных токов требуется строгое постоянство температуры.

Капельно-скоростной плотномер весьма удобен для быстрых систематических определений небольших изменений плотности (например, в медицине при контроле параметров крови).

Существуют и другие капельные методы, используемые главным образом для определения плотности расплавов тугоплавких веществ путем измерения массы и объема капли, подвешенной в высокочастотном поле, лежащей или лежащей капли [23, 60, 61]. Погрешность этих методов лежит в пределах  $\pm (0,2—1)$  %.

В ряде отраслей науки и техники (кристаллография, минералогия, космические исследования и др.) требуются измерения плотности твердых частиц весьма малых размеров (несколько сотен микрометров) и даже микрочастиц диаметром менее 100 мкм. В этих случаях зачастую могут с успехом использоваться скоростные плотномеры, действие которых основано на принципе свободного падения испытываемого тела в жидкости аналогично тому, как это было описано у капельно-скоростного плотномера для жидкостей. Изложенные ранее соображения о теоретических основах плотномера справедливы и в рассматриваемом случае с той лишь разницей, что

<sup>1</sup> Включение и выключение секундомера могут быть автоматизированы при помощи фотоэлектрического устройства (капля при падении последовательно пересекает два луча света).



роль капли выполняет твердая частица (зерно), плотность  $\rho$  которой является искомой.

Как видно из выражения (5-17), время падения испытуемой частицы на определенное расстояние в рабочей жидкости зависит, с одной стороны, от размера частицы, а с другой — от плотности и вязкости жидкости. Влияние размера частицы при увеличении вязкости сказывается тем меньше, чем больше плотность испытуемого вещества. Так как закон Стокса (5-16) справедлив только для шаровых тел, а испытуемые частицы обычно имеют разнообразную форму, это неизбежно должно снижать точность измерений.

В качестве рабочих жидкостей применяют воду, бромформ, четыреххлористый углерод, трихлорэтилен, глицерин, различные масла и др. Жидкость наливают в цилиндр, причем его диаметр должен превышать диаметр частицы не менее чем в 10 раз с тем, чтобы исключить влияние стенок на движение частиц. Целесообразно рабочий цилиндр поместить в другой цилиндр с жидкостью, обеспечивающий стабилизацию температуры в рабочем цилиндре. Если оба цилиндра изготовить из боросиликатного стекла и заполнить их трихлорэтиленом, то благодаря равенству коэффициентов преломления стекла и жидкости устраняется отражение от стенок рабочего цилиндра, он становится невидимым и отсчет ведут по шкале на наружном цилиндре.

Для улучшения видимости твердых частиц при их падении в жидкости рекомендуется освещать (в затемненном помещении) жидкость сверху через инфракрасный светофильтр коаксиальным параллельным пучком света. Это позволяет наблюдать частицы размером от 5 мкм. Размер частиц измеряют при помощи микроскопа (окуляр-микрометра).

Искомую плотность тела находят по градуировочным кривым «время падения — плотность», построенным для частиц разных размеров.

Следует отметить, что положенное в основу данного метода уравнение Стокса справедливо для ламинарного движения, когда значения числа Рейнольдса  $Re$  менее 1, причем  $Re = \rho_{ж} d \omega / \eta$ , где  $d$ ,  $\omega$  — диаметр и скорость движения шарообразной частицы;  $\eta$ ,  $\rho_{ж}$  — динамическая вязкость и плотность жидкости. При  $Re > 1$ , когда режим движения частиц переходный от ламинарного к турбулентному (именно такой режим в большинстве слу-

чаев наблюдается в скоростных плотномерах), скорость падения частиц плотностью  $\rho$  подчиняется уравнению [106]

$$\omega = 25,8d \left[ \frac{(\rho - \rho_{ж})^2}{\rho_{ж}^3 \eta} \right]^{1/3} \quad (5-18)$$

В левую часть уравнения (5-18) необходимо ввести еще поправочный коэффициент, учитывающий отклонение формы частицы от шара; этот коэффициент колеблется от 1 (для шара) до 1,15: частицы нешарообразной формы падают в жидкости медленнее, чем шарообразные. В работе [179] приведены уточненные уравнения скорости частиц в жидкости для разных пределов числа Рейнольдса.

Погрешность измерений скоростным плотномером может достигать  $\pm(0,3-2)\%$  в зависимости от плотности вещества: погрешность тем больше, чем выше плотность [106].

Повышение точности измерений возможно при использовании дифференциального способа, основанного на измерении скорости падения испытуемой твердой частицы в двух различных жидкостях известных плотностей и сравнении полученного результата со скоростью падения контрольной частицы известной плотности в тех же жидкостях. Записав уравнение Стокса для каждого из указанных случаев, после совместного их решения получим:

$$\frac{\rho - \rho_{ж1}}{\rho - \rho_{ж2}} = \frac{\rho_{к} - \rho_{ж1}}{\rho_{к} - \rho_{ж2}} \frac{t_{к1} t_2}{t_{к2} t_1}, \quad (5-19)$$

где  $\rho_{ж1}$ ,  $\rho_{ж2}$  — плотности жидкостей;  $\rho_{к}$  — плотность контрольной частицы;  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_{к1}$ ,  $t_{к2}$  — время падения испытуемой и контрольной частиц в каждой жидкости при одинаковом расстоянии.

Обозначая  $a = t_{к1} t_2 / t_{к2} t_1$  и  $b = (\rho_{к} - \rho_{ж1}) / (\rho_{к} - \rho_{ж2})$ , найдем выражение для вычисления плотности

$$\rho = \frac{\rho_{ж1} - ab\rho_{ж2}}{1 - ab} \quad (5-20)$$

Рассматриваемый дифференциальный способ может быть осуществлен в нескольких разновидностях. В первой разновидности применяют три жидкости (вместо двух), благодаря чему нет необходимости знать плотность контрольной частицы. Вторая разновидность спо-

соба основана на использовании трех различных контрольных частиц, при этом отпадает необходимость в измерении плотности жидкостей.

Дифференциальный способ позволяет снизить погрешность до  $\pm 0,1\%$ .

Скоростные плотномеры оказываются незаменимыми по сравнению, например, с флотационными при исследовании твердых тел большой плотности, для которых не существуют флотационные жидкости. Эти плотномеры обладают также существенным преимуществом перед пикнометрами и гидростатическими весами при работе с частицами весьма малых размеров.

В заключение отметим, что возможности флотационного метода измерения плотности жидкости значительно расширяются, если его сочетать со скоростным методом. Для этого необходимо не только наблюдать безразличное равновесие поплавка, но и измерять скорость его перемещения и принимать во внимание вязкость жидкости [139]. Это позволяет вычислить разность плотностей жидкости и поплавка, а следовательно, определить плотность жидкости. В общем случае

$$\rho = \rho_{\text{п}} + A\omega\eta, \quad (5-21)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  — плотность материала поплавка;  $\omega$  — скорость движения поплавка;  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости;  $A$  — коэффициент, определяемый при градуировке плотномера по жидкости с известной плотностью и вязкостью.

## Часть вторая

### Плотномеры для непрерывных измерений

#### Глава шестая

#### ПОПЛАВКОВЫЕ И ПОПЛАВКОВО-ВЕСОВЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

Действие плотномеров, чувствительным элементом которых служит поплавок (той или иной формы и конструкции), основано на принципе ареометра (см. гл. 1 и 2). Подобно ареометрам поплавки бывают частично или полностью погруженные; в дальнейшем для краткости первые именуются плавающими, а вторые — погруженными. При изменении плотности жидкости или газа, в которых находится поплавок, изменяется выталкивающая сила и поплавок перемещается соответственно вверх или вниз. Если в плотномере измеряется перемещение поплавка, зависящее от искомой плотности, то такие плотномеры условимся называть поплавковыми. Если же измеряется выталкивающая сила, действующая на поплавок, то подобные плотномеры будем называть поплавково-весовыми. К этой же подгруппе относятся и приборы компенсационного типа, где поплавок все время остается в нейтральном (исходном) положении, а выталкивающая сила уравнивается (компенсируется) противоположно направленным усилием, создаваемым тем или иным устройством, причем мерой плотности служит та физическая величина, которая каким-либо способом преобразуется в уравнивающее усилие.

Поплавковые и поплавково-весовые плотномеры обладают высокой чувствительностью. Они предназначены для измерения плотности гомогенных сравнительно чистых жидкостей, а также тонких суспензий. Взвешенные частицы в жидкости могут оседать на поверхности поплавка и тем самым искажать показания прибора.

Существует много разновидностей плотномеров данной группы, отличающихся конструкцией и формой поплавка, устройством для стабилизации потока вещества

через измерительный сосуд, типом (механические, электрические, пневматические, оптические) и принципом действия (индуктивные, потенциометрические и др.) преобразователя перемещений поплавка, способом температурной компенсации и т. д.

Особенности отдельных конструкций рассмотрены в [34, 35, 72, 73].

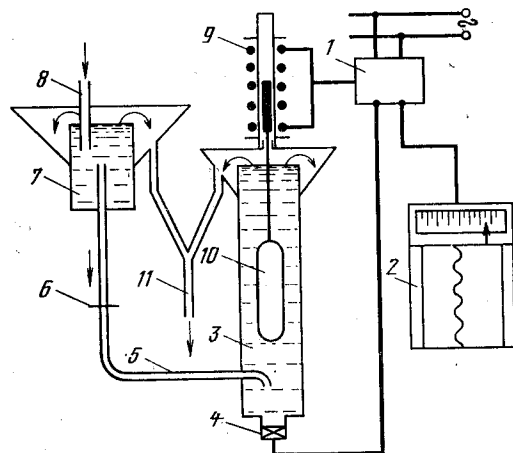


Рис. 6-1. Схема плотномера с плавающим поплавком.

У плотномеров с плавающим поплавком для жидкостей зависимость между глубиной погружения поплавка и искомой плотностью на основании уравнения (1-4) после отбрасывания пренебрежимо малого члена, характеризующего выталкивающую силу, действующую на мениск, принимает вид:

$$\rho = \frac{M + (v + lS)D}{v + lS - La}, \quad (6-1)$$

где  $M$  — масса поплавка за вычетом массы воздуха в его объеме;  $L$  и  $S$  — длина окружности и площадь поперечного сечения стержня поплавка;  $v$  — объем поплавка без стержня;  $l$  — длина погруженной части стержня;  $a$  — капиллярная постоянная.

На рис. 6-1 дана схема плотномера с плавающим поплавком. Жидкость по входной трубе 8 поступает

в переливной сосуд 7, обеспечивающий постоянство напора, а оттуда по подводящей трубе 5 в измерительный сосуд 3, который также снабжен переливным устройством. Требуемая скорость потока устанавливается при помощи диафрагмы 6, а также путем регулирования разности уровней в обоих сосудах (при их взаимном смещении по вертикали). Для отвода излишка жидкости имеется труба 11. Изменение плотности жидкости вызывает перемещение (по вертикали) металлического поплавка 10 и связанного с ним сердечника. Перемещение сердечника через индуктивный датчик 9, включенный в схему измерительного моста 1, передается на вторичный показывающий и самопишущий прибор (или автоматический регулятор) 2, градуированный в единицах плотности. Для коррекции показаний на изменение температуры в схему включен термометр сопротивления 4. Сердечник может быть присоединен и к нижней части поплавка. Возможно расположение переливной трубки внутри поплавкового сосуда. Чтобы исключить возможность образования завихрений в потоке жидкости, которые нарушали бы плавность перемещений поплавка, на выходном конце трубы устанавливаются отражательные пластины.

Простота конструкции плотномера позволяет изготовлять его из коррозионностойких материалов и применять при работе с агрессивными жидкостями и при высоком давлении.

Размеры поплавка определяют расчетным путем, исходя из пределов измерений, цены деления шкалы и нагрузки на поплавок. Оптимальная скорость потока жидкости в корпусе устанавливается таким образом, чтобы, с одной стороны, действующая на поплавок сила, обусловленная скоростным напором, была значительно меньше выталкивающей силы, а с другой, обеспечивался достаточно быстрый обмен жидкости в приборе, исключающий запаздывание показаний.

В ряде конструкций плотномеров плавающий поплавок с сердечником датчика перемещений подвешен к пружине непосредственно [24, 229] (рис. 6-2,а) или через промежуточную вялую мембрану, причем в компенсационных приборах верхний конец пружины укреплен на рычаге узла обратной связи [24]. При этом влияние изменения скорости потока жидкости на выходной сигнал прибора исключается, если поплавок соединен

с двумя сердечниками дифференциально-трансформаторных датчиков и подпружинен с двух сторон вдоль оси, как показано на рис. 6-2, б.

Соответствующей конструкцией поплавка можно обеспечить автоматическую температурную компенсацию. Так, например, поплавок переменной вместимости выполняют в виде тонкостенного сиффона и заполняют

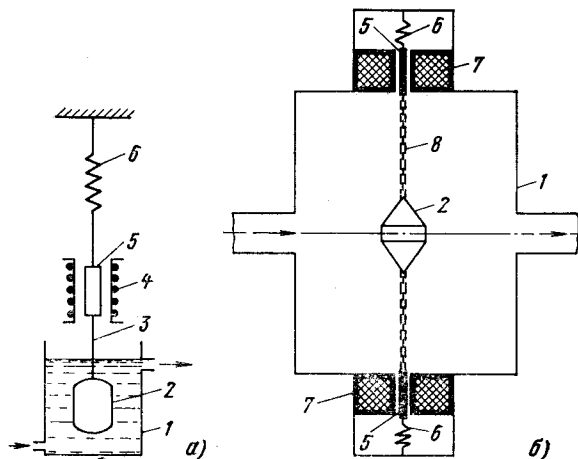


Рис. 6-2. Схемы плотномеров с плавающим поплавком, уравновешенным при помощи пружины.

а — с одним датчиком; б — с двумя датчиками; 1 — резервуар с жидкостью; 2 — поплавок; 3 — проволока; 4 — индуктивный датчик перемещений; 5 — сердечник; 6 — пружина; 7 — дифференциально-трансформаторный датчик; 8 — гибкая связь.

измеряемой жидкостью. Температурные изменения плотности жидкости компенсируются изменением объема поплавка. Ряд других разновидностей поплавков того же назначения рассмотрен в [229, 282].

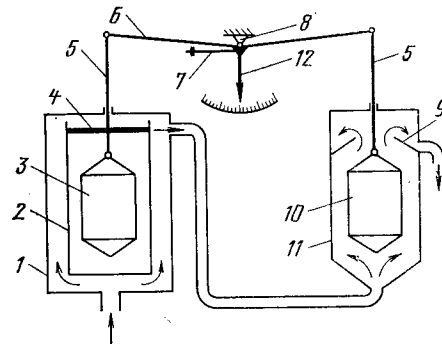
Представляет интерес двухпоплавокный дифференциальный плотномер для агрессивных жидкостей [111], в котором применены цилиндрические поплавки одинакового поперечного сечения и разной длины, подвешенные к коромыслу. Момент, приложенный к коромыслу, прямо пропорционален искомой плотности.

Дифференциальный плотномер с поплавками одинаковой массы, но разного объема позволяет измерять плотность суспензий, в том числе кипящих слоев, а также газов.

Хорошие температурные условия обеспечивает поплавокный плотномер, основанный на измерении плотности жидкости путем ее сравнения с плотностью другой, вспомогательной жидкости (рис. 6-3) [40]. Поток исследуемой жидкости, прежде чем попасть в измерительный сосуд, проходит через промежуточный сосуд, омывая при этом цилиндр со вспомогательной жид-

Рис. 6-3. Схема двухпоплавокного плотномера.

1 — промежуточный сосуд; 2 — цилиндр со вспомогательной жидкостью; 3, 10 — поплавки; 4 — слой парафинового масла; 5 — тяга; 6 — равноплечий рычаг; 7 — регулятор нулевого положения; 8 — опора; 9 — переливное устройство; 11 — измерительный сосуд; 12 — стрелка или держатель пера самописца.



костью. Таким образом достигается равенство температур обеих жидкостей. Вспомогательная жидкость должна обладать таким же коэффициентом теплового расширения, как и исследуемая жидкость. В обе жидкости погружены поплавки практически одинакового объема и одинаковой массы, подвешенные (через демпферы, не показанные на рисунке) к концам равноплечевого углового рычага. Мерой разности выталкивающих сил, действующих на поплавки, т. е. мерой разности плотностей жидкостей, является тангенс угла поворота углового рычага:

$$\rho = \rho_0 (1 \pm \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \alpha), \quad (6-2)$$

где  $\rho$ ,  $\rho_0$  — плотности исследуемой и вспомогательной жидкостей;  $\varphi$  — угол между плечами рычага;  $\alpha$  — угол поворота рычага.

Угол  $\alpha$  измеряют при помощи, например, ферродинамического датчика [164]. Расход жидкости — от 0,03 до 0,3 м<sup>3</sup>/ч. Погрешность прибора  $\pm 0,2$  кг/м<sup>3</sup>, минимальный диапазон шкалы 20 кг/м<sup>3</sup>.

По аналогичной схеме разработан компенсационный двухпоплавокный плотномер, в котором предусмотрен пневмопреобразователь, основанный на уравновешивании сил [79]. Диапазон шкалы изменяется от 25 до

160 кг/м<sup>3</sup>. Погрешность, отнесенная к минимальному диапазону, ±2,5%. Расход жидкости — до 300 м<sup>3</sup>/ч.

К числу основных недостатков плотномеров с плавающим поплавком относятся громоздкость (из-за значительной высоты), зависимость показаний от капиллярных свойств жидкости и скорости потока и необходимость применения открытого корпуса прибора.

В плотномерах с погруженным поплавком действующая на него выталкивающая сила  $F$  связана с искомой плотностью жидкости зависимостью (см. гл. 2)

$$\rho = \frac{F}{Vg}, \quad (6-3)$$

где  $V$  — объем поплавка.

У таких плотномеров может быть исключено или сведено к минимуму влияние капиллярных свойств жидкости. Важным достоинством этих плотномеров является равномерная шкала.

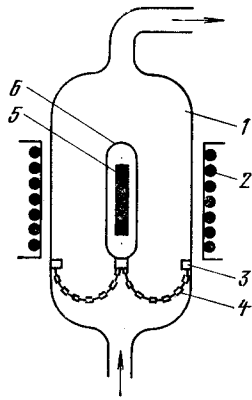


Рис. 6-4. Схема плотномера с погруженным поплавком, уравновешенным при помощи цепочек.

На рис. 6-4 показана схема плотномера с погруженным поплавком, уравновешенным при помощи цепочек [220]. Выталкивающая сила, действующая на тонкостенный цилиндрический поплавок 6, уравнивается весом поплавка и части калиброванных цепочек 4. Массу  $M$  и объем  $V$  поплавка рассчитывают таким образом, что, когда его равновесное положение соответствует середине диапазона измерений, масса цепочек распределяется равномерно между опорными точками 3 и точкой подвеса к поплавку (все эти точки рас-

положены в одной горизонтальной плоскости), тогда справедливо выражение

$$M + 0,5nm = V\rho_{\text{ср}}, \quad (6-4)$$

где  $m$  — масса одной цепочки;  $n$  — число цепочек;  $\rho_{\text{ср}}$  — плотность, соответствующая середине диапазона измерений.

При увеличении плотности жидкости выталкивающая сила возрастает, поплавок всплывает и вес цепочки рас-

пределяется так, что большая часть оказывается приложенной к поплавку. Равновесие поплавок наступит тогда, когда прирост выталкивающей силы уравнивается приростом силы тяжести цепочек, действующей на поплавок. При уменьшении плотности поплавков опускается из-за уменьшения выталкивающей силы, так что большая часть веса цепочки действует на опорную точку.

В поплавках встроены сердечники 5 из ферромагнитного материала, а измерительная камера 1 помещена внутрь катушки индуктивного датчика перемещений 2. Для уменьшения динамического воздействия потока на поплавок жидкость вводится в камеру и выводится из нее по группам вертикальных трубок с радиальными отверстиями (на рисунке не показано) [32]. Другой способ состоит в том, что поплавок окружен защитной трубой, по которой пропускают измеряемый поток с постоянным расходом до 0,06 м<sup>3</sup>/ч, а остальная часть потока поступает между трубой и стенками камеры [220]. Расход регулируют с помощью сопла. Общий расход жидкости — до 2,5 м<sup>3</sup>/ч.

Влияние потока жидкости и температуры на показания цепочкового плотномера исследовано в [144].

Зависимость между перемещением поплавка и силой, действующей на него со стороны цепочек, описывается уравнением (2-6). Его анализ показывает, что для получения равномерной шкалы необходимо соблюдать соотношение  $l/x \geq 1,75$  [32].

Цепочки изготовляют из платино-иридиевого сплава, а поплавков и камеру — из любого пригодного для заданных условий материала (стекла, латуни, нержавеющей стали и т. д.). Пределы измерений изменяют сменой поплавка и цепочек. Высокая чувствительность прибора позволяет использовать его для малых диапазонов шкалы (5 кг/м<sup>3</sup> и более), однако для диапазонов около 100 кг/м<sup>3</sup> по конструктивным соображениям рекомендуется применять цепочки или гибкие нити с подвешенными дополнительными грузами [32].

Погрешность цепочкового плотномера ±1,5%, а с термокомпенсацией — до ±3%.

Следует заметить, что цепочковое нагружение применяют и в плотномерах с плавающим поплавком: к поплавку кроме цепочек крепится (снизу или сверху) сер-

дечник, с помощью которого фиксируется перемещение поплавка, как, например, на рис. 6-1.

Надежные результаты дает поплавок, выполненный в виде кольца с укрепленным на нем постоянным магнитом [50]. Кольцо может перемещаться (с зазором)

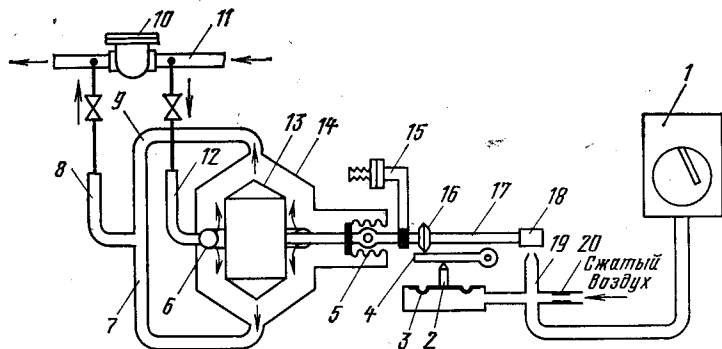


Рис. 6-5. Схема компенсационного плотномера с пневмопреобразователем.

1 — манометр; 2 — толкатель; 3 — мембрана обратной связи; 4 — рычаг; 5 — уплотнительный сильфон; 6 — кольцевой распылитель; 7 — нижний отводящий патрубков; 8 — отводящая труба; 9 — верхний отводящий патрубков; 10 — вентиль; 11 — трубопровод; 12 — подводящая труба; 13 — поплавок; 14 — измерительная камера; 15 — регулятор нижнего предела измерений; 16 — ролик; 17 — коромысло; 18 — заслонка; 19 — сопло; 20 — дроссель.

снаружи вертикальной трубы из немагнитного материала с размещенным в ней преобразователем перемещения, который представляет собой ферритно-полупроводниковый распределитель, подключенный на выход генератора тактовых импульсов.

Плотномеры с погруженным поплавком часто выполняют как поплавково-весовые. Примером может служить компенсационный прибор (рис. 6-5) с пневматическим преобразователем, основанным на принципе уравнивания сил.

Часть жидкости, протекающей по трубопроводу, непрерывно поступает в измерительную камеру под действием перепада давления, который создается вентилем или каким-либо другим устройством для сужения потока. Жидкость течет снизу вверх вдоль верхней половины поплавка и сверху вниз вдоль его нижней половины, что обеспечивает минимальное воздействие потока на поплавок. Поплавок посажен на конце коромысла, у равнове-

шенного противовесом так, чтобы поплавок начинал перемещаться вверх в жидкости наименьшей плотности, равной нижнему пределу измерений прибора. При измерениях коромысло удерживается в исходном положении равновесия при помощи пневматического преобразователя, содержащего сопло-заслонку и систему обратной связи, в которую входит мембрана с толкателем.

Давление  $P$ , действующее на мембрану, и выталкивающая сила  $F$ , приложенная к поплавку, связаны зависимостью

$$P = A \frac{F}{S},$$

где  $A$  — отношение расстояний точек приложения соответствующих сил от оси поворота коромысла;  $S$  — эффективная площадь мембраны.

Вследствие постоянства  $S$  (из-за малости хода заслонки) принимают  $P = C_p$ , где  $C$  — коэффициент пропорциональности. Выходное давление изменяется в диапазоне 0,2—1 кгс/см<sup>2</sup> (19,6—98,0 кПа) по линейному закону. Регулирование нижнего предела измерений осуществляется путем сдвига груза регулятора. Изменение

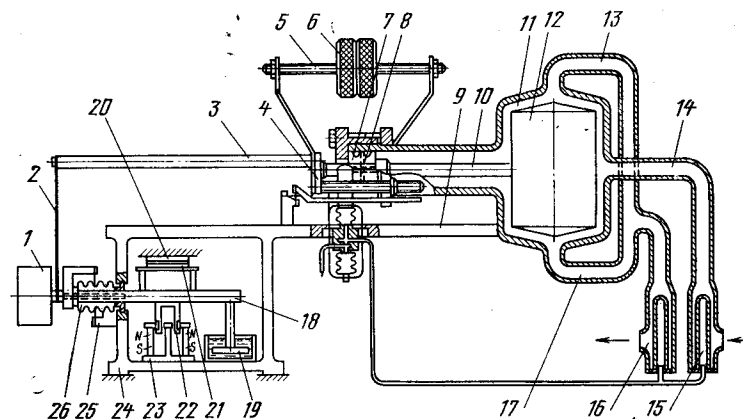


Рис. 6-6. Схема компенсационного плотномера с электропреобразователем.

1 — уравнивающий груз; 2 — гибкая тяга; 3 — стержень; 4 — траверса; 5 — резьбовой валик; 6 — настроечные грузы; 7 — уплотнительный сильфон; 8, 25 — крестообразный шарнир; 9 — плита; 10 — стержень; 11 — измерительная камера; 12 — поплавок; 13, 17 — выводные трубки; 14 — входная трубка; 15, 16 — камеры с термобаллонами; 18 — рычаг обратной связи; 19 — демпфер; 20 — сеточная катушка генератора высокой частоты; 21 — экран; 22 — катушка обратной связи; 23 — постоянный магнит; 24 — корпус; 26 — пылезащитный сильфон.

верхнего предела и диапазона измерений возможно за счет соответствующего выбора размеров поплавка и мембраны и их расстояний от оси поворота коромысла. Наименьший достижимый диапазон шкалы составляет  $50 \text{ кг/м}^3$ . Верхний предел измерений практически неограничен.

На рис. 6-6 показана схема аналогичного плотномера, оснащенного электрическим узлом обратной связи и устройством температурной компенсации, автоматически приводящим значение плотности к  $20^\circ\text{C}$  [36]. Максимальный расход жидкости  $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , давление — до  $20 \text{ кгс/см}^2$  ( $2 \text{ МПа}$ ), температура — до  $110^\circ\text{C}$ . Диапазон измерений  $500\text{—}1200 \text{ кг/м}^3$ . Диапазон шкалы  $50, 100$  или  $150 \text{ кг/м}^3$ ; погрешность  $\pm 1\%$  диапазона, выходной сигнал  $0\text{—}20 \text{ мА}$ .

В поплавково-весовых плотномерах широкое развитие получил принцип компенсации выталкивающей силы, действующей на погруженный поплавок, электромагнитным тяговым усилием соленоида, которое приложено к подвешенному в его магнитном поле сердечнику [70]. Мерой изменения плотности является ток соленоида (см. также § 3-6). Диапазон шкалы такого прибора примерно  $20 \text{ кг/м}^3$ , погрешность  $\pm 2\%$  диапазона, допустимый расход жидкости  $0,02 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для плотномеров агрессивных сред рекомендуется магнитная подвеска на постоянных магнитах [71].

Электромагнитные плотномеры можно применять в широком диапазоне температур и давлений [214, 263].

В приборах для измерения плотности жидкости или газа, протекающих по горизонтальному трубопроводу, пустотелый погруженный поплавок выполняют в виде удлиненного тела, расположенного по оси трубопровода. Поплавок одним концом жестко связан с торсионной трубкой или натянутой струной [44, 31]; при помощи этой трубки (струны) измеряют момент, пропорциональный выталкивающей силе, т. е. плотности. Если поплавок закреплен консольно, то возникающий момент можно измерить при помощи наклеенных на него тензорезисторов.

Повышенными быстродействием и чувствительностью при одновременном упрощении схемы обладает плотномер с погруженным поплавком, показанный на рис. 6-7 [46]. В исходном положении, когда в катушку индуктивности 4 подан ток, ферромагнитный сердечник 3 прижи-

мает пустотелый шаровидный поплавок 2 из кварца к катушке. При выключении тока поплавок под действием выталкивающей силы всплывает и соприкасается с чувствительным элементом 1 датчика интервалов времени. Время движения поплавка является мерой искомой плотности жидкости. При ширине зазора между поплавком и чувствительным элементом  $0,5\text{—}0,7 \text{ мм}$ , диаметре поплавка  $100 \text{ мм}$  порог чувствительности прибора, заполненного водой, составляет  $0,03 \text{ кг/м}^3$ .

Оригинальной разновидностью поплавковых плотномеров является прибор с поворотным поплавком [108, 231]. Цилиндрический поплавок с горизонтальной осью крепится эксцентрично на торце диска, расположенного вертикально, или кольца. Мерой плотности жидкости служит угол поворота цилиндра с диском относительно оси диска. Такой плотномер может быть использован, в частности, для измерений в широком диапазоне давлений [231]. Существуют и другие конструкции поворотных поплавков [269]. Плотномер с двумя поворотными поплавками позволяет вести измерения и на движущихся объектах [258].

Поплавково-весовые плотномеры коромыслового типа получили широкое распространение для измерения плотности газов и паров (см. гл. 3). Типовая схема такого плотномера показана на рис. 6-8. Герметичный стеклянный шаровой поплавок 2 заполнен сухим воздухом или инертным газом с известной плотностью. Площадь наружной поверхности поплавка и общая площадь наружной и внутренней поверхностей противовеса приблизительно одинаковы, что позволяет исключить влияние конденсации, поглощения газа стеклом обоих тел, а также оседания на них посторонних частиц.

Для создания непрерывного потока через корпус прибора (расход около  $0,12 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) давление испытуемого газа на входе должно быть не менее  $30 \text{ кгс/м}^2$  ( $300 \text{ Па}$ ). При изменении температуры или давления газа мембранная коробка, соединенная с полостью закрытого шара, воздействует на рычаг 9, смещая центр тяжести коромысла и обеспечивая автоматическое приведение

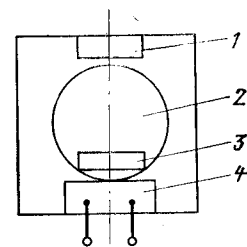


Рис. 6-7. Схема плотномера с измерением времени движения поплавка.

показаний к нормальному состоянию газа. Коррекция осуществляется при колебании давления  $\pm 500$  кгс/м<sup>2</sup> (5 кПа) и температуры  $\pm 15^\circ\text{C}$ . Погрешность показаний  $\pm 0,002$  кг/м<sup>3</sup>, или от  $\pm 0,5$  до  $\pm 1\%$  верхнего предела измерений. Наименьший диапазон шкалы 0,1 кг/м<sup>3</sup>.

В этих плотномерах коромысло может быть также подвешено на горизонтальной кварцевой нити или тор-

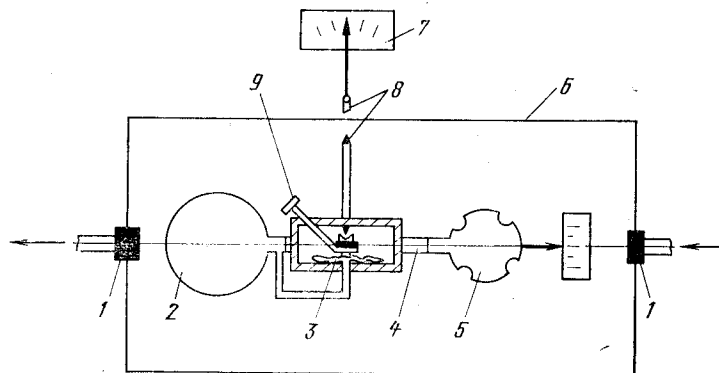


Рис. 6-8. Схема поплавково-весового плотномера для газов.  
1 — фильтр; 2 — поплавок; 3 — мембранная коробка; 4 — коромысло; 5 — полый противовес с отверстиями; 6 — герметичный корпус; 7 — вторичный прибор; 8 — магнитная муфта; 9 — грузовой рычаг.

сионной трубке, которая при изменении плотности газа закручивается на определенный угол.

Рассмотренные плотномеры для газов выполняются и как компенсационные приборы, например, с магнитной подвеской [196], а также с силовой пневматической или электрической компенсацией [178, 271]. Такие плотномеры рассчитаны на высокое давление — до 180 кгс/см<sup>2</sup> (18 МПа). Погрешность — от  $\pm 0,25$  до  $\pm 0,5\%$  верхнего предела измерений.

Датчик компенсационного дифференциального плотномера состоит из двух одинаковых вакуумированных кварцевых шаров, соединенных между собой горизонтальным коромыслом [190]. Один шар находится в камере, через которую протекает испытуемый газ, другой — в камере с контрольным газом известной плотности. Если плотности газов различны, то коромысло стремится по-

вернуться; этот поворот фиксируется при помощи соответствующего датчика (фотоэлектрического, ферродинамического и др.), посылающего сигнал в систему обратной связи.

## Глава седьмая

### ОБЪЕМНО-ВЕСОВЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

Принцип действия объемно-весовых плотномеров основан на том, что масса вещества при неизменном его объеме прямо пропорциональна плотности, т. е. для измерения плотности достаточно непрерывно взвешивать определенный объем вещества, протекающего по трубопроводу.

Основные преимущества этих плотномеров: возможность применения для пульп, суспензий, загрязненных, вязких и летучих жидкостей; независимость показаний от свойств и скорости протекания жидкости; возможность измерения при повышенном давлении (до 25 кгс/см<sup>2</sup>  $\approx$  2,5 МПа); постоянное поперечное сечение измерительной полости прибора, что исключает осаждение твердых включений, содержащихся в потоке; высокая чувствительность и малая погрешность (от  $\pm 0,5$  до  $\pm 1\%$ ); возможность регулирования диапазона измерений в широких пределах (от 100 до 2000 кг/м<sup>3</sup>). Ограничение области применения объемно-весовых плотномеров связано с недопустимостью газовых включений в жидкости.

Типичная схема, в которой непосредственно реализуется указанный выше принцип, показана на рис. 7-1,а. Измерительный сосуд известного объема соединен снизу и сверху с винтовыми трубчатыми пружинами, которые служат для ввода и отвода жидкости. Масса сосуда как мера искомой плотности измеряется коромысловыми весами.

У плотномера, изображенного на рис. 7-1,б [152], уравнение равновесия системы имеет вид:

$$(m + V\rho)g = Mg + Cx, \quad (7-1)$$

где  $m$ ,  $V$  — масса и объем сосуда;  $\rho$  — плотность жидкости;  $M$  — масса противовеса;  $x$ ,  $C$  — перемещение и



жесткость пружины. При начальной плотности  $\rho_H$

$$M = m + \rho_H V. \quad (7-2)$$

Из уравнений (7-1) и (7-2) получаем:

$$x = \frac{gV}{C} (\rho - \rho_H). \quad (7-3)$$

Перемещение пружины и противовеса, являющееся функцией искомой плотности, фиксируется при помощи индуктивного преобразователя. Погрешность прибора составляет  $\pm 1\%$  диапазона измерений.

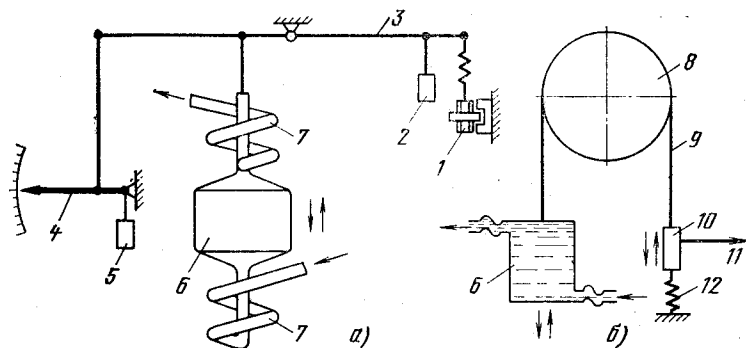


Рис. 7-1. Схемы объемно-весовых плотномеров с подвижным сосудом.

*a* — с коромысловыми весами; *б* — с индуктивным преобразователем; 1 — регулятор нулевого положения; 2 — сменный груз для настройки диапазона измерений; 3 — коромысло; 4 — стрелка; 5 — противовес; 6 — измерительный сосуд; 7 — трубчатая пружина; 8 — блок; 9 — трос; 10 — противовес; 11 — к индуктивному преобразователю; 12 — пружина.

Взвешивание сосуда с протекающей жидкостью возможно также при помощи тензорезисторного устройства [185]. Сосуд сверху и снизу подвешен на двух параллельных плоских пружинах, на обеих сторонах которых наклеены тензометрические датчики. Датчики включены в мостовую схему автоматического потенциометра.

Наибольшее развитие и распространение получили объемно-весовые плотномеры, в которых чувствительным элементом служит подвижный измерительный участок трубы, расположенный горизонтально и соединенный с неподвижным технологическим трубопроводом при помощи эластичных элементов (сильфонов, манжет и др.). Измерительный участок может быть прямым или петлеобразным. Такие плотномеры особенно пригодны

для работы с пульсами (гидросмесями). В трубных плотномерах изменение массы измерительного участка, являющееся функцией изменения плотности жидкости, вызывает перемещение участка вверх или вниз, которое фиксируется соответствующим датчиком перемещения.

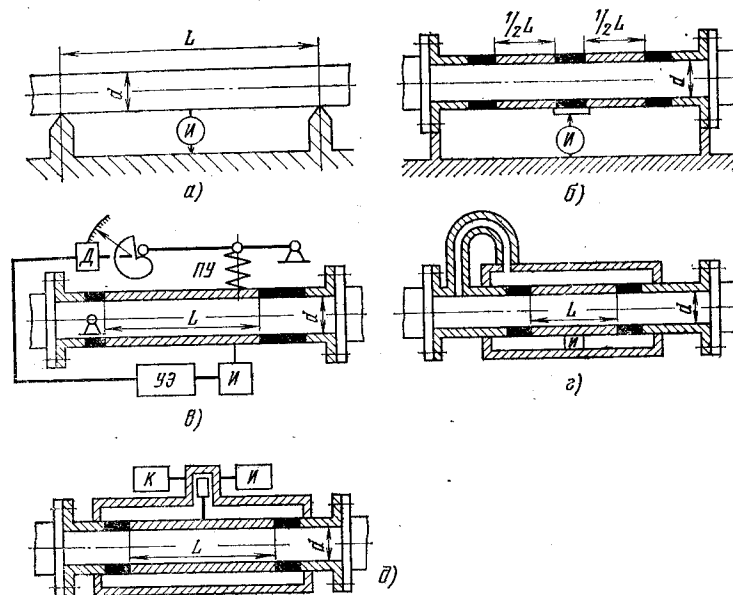


Рис. 7-2. Принципиальные схемы чувствительных элементов трубных плотномеров.

*a* — трубопроводного; *б* — с манжетами, нагруженными давлением, и составным измерительным участком; *в* — с манжетами, нагруженными давлением, и консольным измерительным участком; *г* — с манжетами, разгруженными от давления, и открытым разгрузочным корпусом; *д* — с манжетами, разгруженными от давления, и закрытым разгрузочным корпусом; *И* — измерительный преобразователь перемещения; *ПУ* — уравновешивающая пружина; *Д* — двигатель привода натяжения пружины; *УЭ* — электронный усилитель; *К* — силовой компенсатор.

Чувствительные элементы плотномеров с прямой трубой можно объединить в несколько групп, характеризующихся схемами, показанными на рис. 7-2 [94]. Первую группу образуют чувствительные элементы, основанные на использовании упругих свойств трубопровода (рис. 7-2, *a*). Их чувствительность определяется выражением

$$\frac{dl}{d\rho} = \frac{kLs}{dPE}, \quad (7-4)$$

где  $l$  — прогиб середины измерительного участка;  $k$  — постоянная;  $L, d$  — соответственно длина и диаметр участка;  $P$  — допускаемое давление;  $E, \sigma$  — модуль Юнга и допускаемое напряжение материала трубопровода.

На выходной сигнал датчика влияют участки трубопровода, расположенные вне опор измерительного участка: при подходе жидкости повышенной плотности середина измерительного участка начинает подниматься.

Ко второй группе относятся чувствительные элементы, у которых измерительный участок соединен с трубопроводом тремя (рис. 7-2,б) или двумя (рис. 7-2,в) эластичными манжетами, причем опирается на пружину или удерживается в равновесном положении системой силовой компенсации. Манжеты обычно изготавливают из резины, и их жесткость значительно меньше жесткости  $C_{\Pi}$  пружины или силового компенсатора. В этом случае чувствительность

$$\frac{dl}{d\rho} = \frac{\pi d^2 L}{4C_{\Pi}} \quad (7-5)$$

Применение этих датчиков ограничено диаметром трубопровода и давлением, так как с их ростом необходимо увеличивать толщину манжет, отчего снижается чувствительность. От данного недостатка свободны чувствительные элементы третьей группы с гидравлической разгрузкой манжет от давления, которая осуществляется двумя способами. По первому способу полость разгрузочного корпуса соединяют с трубопроводом U-образной трубой (рис. 7-2,з), по которой исследуемая жидкость поступает в корпус, благодаря чему выравнивается давление по обе стороны манжет. Попадание в корпус твердых частиц предотвращается установкой на входе в соединительную трубу кармана-отделителя или сильфонного разделителя. По второму способу (рис. 7-2,д) полость корпуса заполняют вспомогательной жидкостью, передающей давление от исследуемой жидкости. Датчики с разгрузочным корпусом обладают наибольшей чувствительностью.

Для исключения погрешностей от давления и температуры разработан датчик, у которого на наружной поверхности разгрузочного корпуса в диаметрально противоположных точках, но в одной плоскости установлены два дифференциальных трансформатора [95] (рис. 7-3). Их первичные обмотки соединены между собой последо-

вательно и синфазно, а вторичные — последовательно, но в противофазе. Сигналы, вызываемые деформацией корпуса под действием давления и температуры, вычитаются, а сигналы, создаваемые изменением плотности измеряемой среды, складываются. Поэтому чувствительность электрического преобразования перемещения в выходной сигнал увеличивается вдвое.

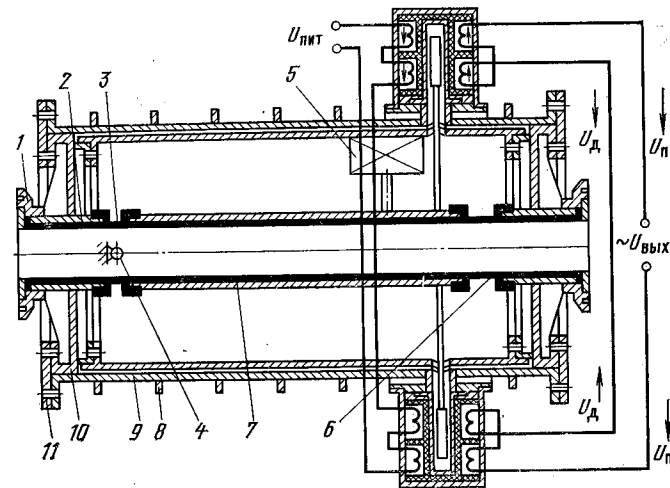


Рис. 7-3. Схема датчика трубного плотномера.

1 — соединительный фланец; 2 — патрубок; 3 — манжета, работающая на изгиб; 4 — ось; 5 — элемент силовой компенсации; 6 — манжета, работающая на сдвиг; 7 — измерительный участок; 8 — кольцо жесткости; 9 — разгрузочный корпус; 10 — жесткое дно; 11 — кольцевой фланец;  $U_{\Pi}$ ,  $U_{\Pi}^{-}$  — составляющие напряжения дифференциального трансформатора от изменения давления и плотности.

Важным достоинством плотномеров с прямой трубой является отсутствие местных гидравлических сопротивлений потоку жидкости.

В плотномере, предназначенном для установки в трубопроводах с любым наклоном к горизонтالي, измерительный участок трубы консольно подвешен на двух осевых торсионных разделителях и взвешивается с помощью грузорычажного автокомпенсатора, не реагирующего на наклон датчика [159].

Среди трубных плотномеров во всех промышленно развитых странах широко используют плотмеры с петлеобразной U-образной трубой. Обычно эти плотмеры

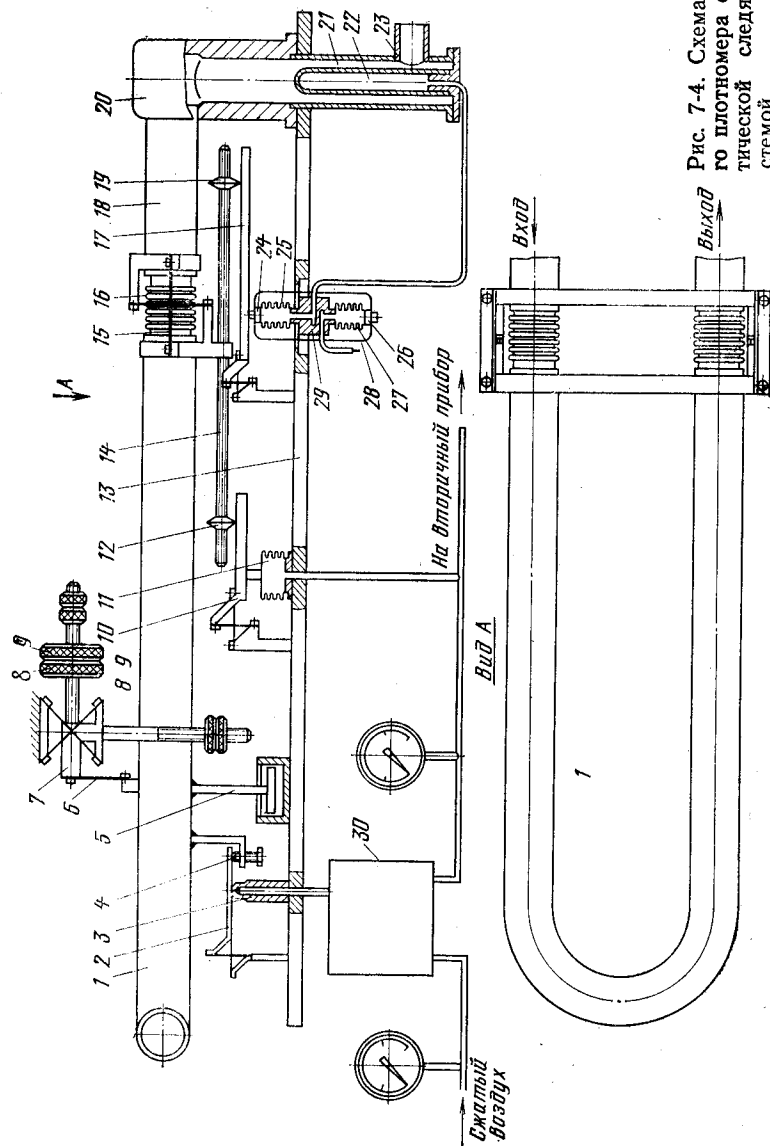


Рис. 7-4. Схема петлевого плотномера с пневматическим преобразователем и термокомпенсатором.

выполняют по схеме уравнивания сил, используя пневматический или электрический узел обратной связи. На рис. 7-4 представлена принципиальная схема петлевого плотномера с пневмопреобразователем и термокомпенсатором [36]. Петлевая труба 1 связана с неподвижным кронштейном 20 крестообразным шарниром 15. Сильфоны 16 соединяют концы трубы с патрубками 18 кронштейна. Гибкое соединение трубы обеспечивает возможность ее поворота вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр шарнира. Патрубки 18 связаны с вводными патрубками 23, в карманах 21 которых помещаются термобаллоны 22 системы температурной компенсации.

К трубе жестко прикреплены поршень 5 гидравлического демпфера, регулировочный винт 4 заслонки 2, прикрывающей выход сжатого воздуха из сопла 3, и резьбовой стержень 14, несущий на себе два ролика. Один из них 12 опирается на рычаг 10 обратной связи, а второй 19 — на рычаг 17 температурной компенсации. Линия сопла 3 присоединена к верхней полости пневматического мембранного усилителя 30, к выходу которого подведены сильфон 11 обратной связи и линия вторичного прибора. Труба связана гибкой тягой 6 с рычагом 7 противовеса, подвешенным на крестообразном шарнире и несущим грузы 8 и 9 для грубой и точной настройки равновесия. В систему температурной компенсации входят два сильфона: основной 25 и дополнительный 27. Сильфоны одним концом приварены к общему основанию 29, неподвижно закрепленному на плите 13. Вторые концы сильфонов снабжены днищами 24 и 26, которые жестко связаны между собой рамкой 28, скрепленной с рычагом 17.

Подвижная система датчика первоначально уравнивается путем регулировки настроечных грузов противовеса так, чтобы при заполнении трубы жидкостью с плотностью, соответствующей нижнему пределу измерения, давление сжатого воздуха на выходе усилителя было равно  $0,2 \text{ кг/см}^2$  ( $19,6 \text{ кПа}$ ). При увеличении плотности жидкости увеличивается масса подвижной системы (и ее вес), заслонка прикрывает сопло и давление воздуха на выходе возрастает до тех пор, пока приращение усилия, развиваемого сильфоном 11, не уравнивает приращение веса системы. Так как рабочее перемещение заслонки и связанное с ним изменение

упругих сил в подвижной системе очень малы, то изменение выходного пневматического сигнала прямо пропорционально изменению плотности жидкости.

Термобаллоны 22, соединенные капиллярами между собой и с сильфоном 25, образуют газовый манометрический термометр (система заполнена азотом под избыточным давлением). Один из термобаллонов омывается жидкостью на входе датчика, а второй — на выходе, вследствие чего изменения давления газа пропорциональны изменениям средней температуры жидкости, заполняющей петлевую трубу. Под действием этого давления сильфон 25 развивает усилие, которое через рычаг 17, ролик 19 и стержень 14 передается подвижной системе датчика и изменяет условия ее равновесия. С повышением температуры жидкости плотность ее уменьшается и выходное давление также должно было бы уменьшаться, но развиваемое сильфоном 25 усилие нарушает равновесие датчика в таком направлении, что достигается компенсация изменений плотности жидкости, связанных с изменениями ее температуры. Температурная поправка плотности определяется положением ролика 19 на стержне 14.

Развиваемое сильфоном 25 усилие зависит и от внешних факторов — температуры окружающего воздуха и барометрического давления. Для компенсации влияния внешних факторов служит сильфон 27, действующий навстречу сильфону 25 и одинаковый с ним по конструктивным данным. Сильфон 27 заполнен азотом, абсолютное давление которого во столько раз меньше абсолютного давления в сильфоне 25, во сколько раз объем газа в сильфоне 25 и капиллярах меньше суммарного объема газа в термосистеме.

Основные технические характеристики описанного плотномера: диапазон шкалы 50, 100 и 150 кг/м<sup>3</sup>; максимальное давление 15 кгс/см<sup>2</sup> (1,5 МПа); максимальная температура жидкости 110°C; наибольший расход 2,4 м<sup>3</sup>/ч; основная погрешность ±1% диапазона шкалы. Такие же характеристики имеет плотномер с токовым выходным сигналом, выполненный по той же схеме.

На рис. 7-5 показана принципиальная схема петлевого плотномера с электрическим узлом обратной связи [42, 128]. Петлевая труба 1 находится в равновесии, когда она заполнена жидкостью с плотностью, равной

нижнему пределу измерений (например, водой с плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup>). Для начального уравнивания трубы служит рычажная система 2. При протекании через трубу жидкости большей плотности свободный конец трубы, опускаясь, передвигает ферромагнитный сердечник дифференциально-трансформаторного датчика перемещения 3. Сигнал рассогласования из датчика поступает в электронный усилитель с фазочувствитель-

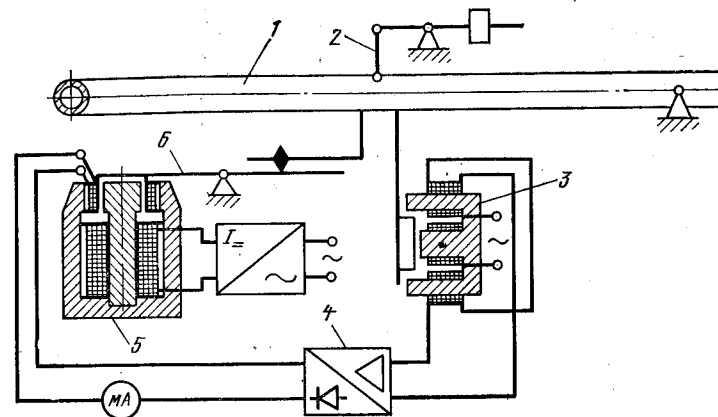


Рис. 7-5. Схема петлевого плотномера с электрической следящей системой.

ным демодулятором 4 и преобразуется в постоянный ток, пропорциональный искомой плотности. Ток через миллиамперметр (или потенциометр) поступает в подвижную рамку ферродинамического силового механизма 5, где преобразуется в пропорциональную току силу, приложенную к центру рамки; рамка укреплена на плече рычажного механизма уравнивания силы тяжести трубы.

Основные технические характеристики прибора: диапазон измерений 1000—2500 кг/м<sup>3</sup>; температура жидкости — до 80°C; погрешность ±1% диапазона шкалы; выходной сигнал 0—20 мА.

Петлевыми плотномерами можно пользоваться и при работе с агрессивными жидкостями: имеются специальные модели, в которых труба изготовлена из коррозионно-стойкого материала. Электрополировка внутренней поверхности трубы позволяет уменьшить осаждение твердых частиц, содержащихся в жидкости.

С различными разновидностями и конструкциями объемно-весовых плотномеров можно ознакомиться в работах [34, 35, 72, 73].

## Глава восьмая

### ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОМЕРЫ

Принцип действия гидростатических плотномеров для непрерывных измерений тот же, что и у плотномеров дискретного действия (см. гл. 5), причем описывается основным уравнением (5-1). Гидростатические плотномеры разделяют на две группы: приборы, непосредственно измеряющие давление столба жидкости, и приборы, измеряющие давление столба жидкости косвенным путем (например, через жидкость продувают газ, и его давление равно давлению столба жидкости, преодолеваемого газом).

Таковыми плотномерами можно измерять плотность вязких, загрязненных, кристаллизующихся и агрессивных жидкостей; они пригодны как для открытых, так и для закрытых резервуаров. Их показания не зависят от скорости потока жидкости и ее поверхностного натяжения. Весьма удобна передача показаний на расстояние.

Недостатки этих плотномеров: для получения высокой точности измерения требуется большая высота столба жидкости (примерно 1 м), что приводит к громоздкости прибора и запаздыванию показаний; непрерывное продувание газа через жидкость искажает показания из-за насыщения жидкости газом.

В плотномерам первой из указанных выше групп давление столба жидкости можно непосредственно измерять при помощи, например, мембранного манометра [235]; чувствительный элемент манометра помещают в нижней части сосуда, через который протекает исследуемая жидкость, причем уровень ее поддерживается постоянным, как показано, например, в гл. 6.

Чтобы исключить влияние колебаний уровня жидкости, применяют дифференциальный метод при измерении разности давлений  $\Delta P$  двух столбов жидкости разной высоты:

$$\Delta P = gh\rho, \quad (8-1)$$

где  $h$  — разность высот столбов жидкости.

Следовательно, перепад давления жидкости в двух горизонтальных слоях, расстояние между которыми неизменно, пропорционален плотности жидкости и служит ее мерой.

Дифференциальный плотномер с непосредственным измерением давления жидкости в вертикальном трубопроводе (или резервуаре) представляет собой два датчика давления 2, установленных на определенном рас-

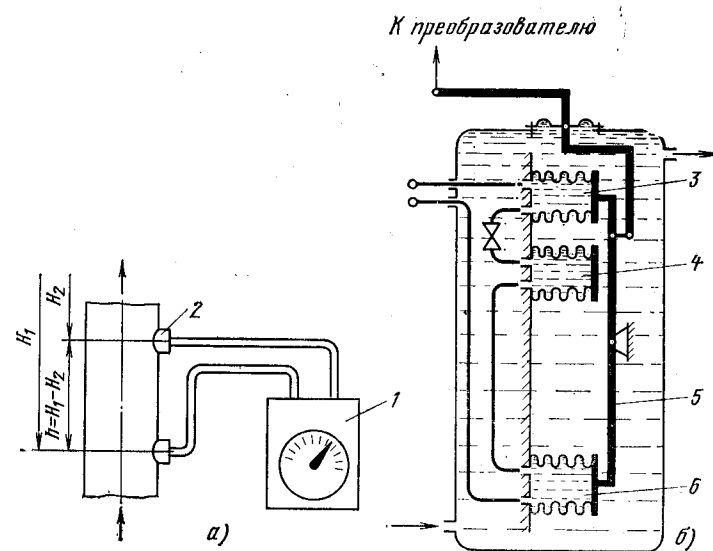


Рис. 8-1. Дифференциальный гидростатический плотномер.  
а — принципиальная схема; б — сильфонный плотномер с обратной связью.

стоянии друг от друга (по вертикали) и подключенных к дифманометру 1 (рис. 8-1,а). Датчиком давления служит мембранный блок, представляющий собой две резиновые или металлические мембраны, соединенные друг с другом по периферии так, чтобы образовалась замкнутая полость. В качестве датчиков давления дифференциального плотномера можно использовать также две гофрированные металлические мембраны, каждая из которых установлена во вваренном в трубопровод патрубке. С одной стороны на мембрану действует давление исследуемой жидкости, а с другой — давление воздуха, накачиваемого в воздушную полость патрубка, причем подача воздуха автоматически регулируется та-

ким образом, чтобы его давление уравнивало давление жидкости.

Известны также дифференциальные гидростатические плотномеры с одним мембранным датчиком, в полости которого по трубкам подводится жидкость из двух слоев, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии по вертикали. Прогиб мембраны преобразуется в электрическую величину с помощью двух электромагнитов, расположенных по обе стороны мембраны и включенных в мостовую схему.

При измерении плотности жидкостей с твердыми включениями для повышения надежности плотномера рекомендуется применять разделительные устройства в виде цилиндра с подвижным поршнем, взаимодействующим (через промежуточную жидкость) с датчиком давления [130].

На рис. 8-1,б показана схема сильфонного плотномера с системой обратной связи. Чувствительный элемент прибора, состоящий из двух сильфонов 3 и 6, заполненных вспомогательной жидкостью, и коромысла 5, преобразует разность давлений, пропорциональную плотности исследуемой жидкости, в усилие, которое воспринимается пневматическим или электрическим преобразователем. Сильфон 4, полость которого соединена с рабочими сильфонами, служит для температурной компенсации.

Основные технические характеристики сильфонных плотномеров: диапазон измерений 500—2500 кг/м<sup>3</sup>; диапазон шкалы — от 50 до 500 кг/м<sup>3</sup>; выходной сигнал — токовый 0—20 или 0—5 мА, пневматический 0,2—1 кгс/см<sup>2</sup> (19,6—98 кПа); рабочее давление — до 25 кгс/см<sup>2</sup> (2,5 МПа); температура жидкости — до 100°С; погрешность ±1% диапазона шкалы.

Расстояние между точками отбора давления (рис. 8-1) и необходимые пределы измерений дифманометра связаны зависимостями, вытекающими из уравнения (8-1):

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\max} &= gh\rho_{\max}; \\ \Delta P_{\min} &= gh\rho_{\min}. \end{aligned} \right\} \quad (8-2)$$

где  $\Delta P_{\max}$ ,  $\Delta P_{\min}$  — верхний и нижний пределы измерений дифманометра;  $\rho_{\max}$ ,  $\rho_{\min}$  — предельные значения плотности исследуемой жидкости.

Обычно диапазон шкалы, на который должен быть рассчитан плотномер, невелик, причем нижний предел измерений далек от нуля, в то время как нижний предел показаний дифманометра равен нулю. Как вытекает из (8-2), соотношение длины  $l_{\Pi}$  участка, занимаемого шкалой плотности, и общей длины  $l$  шкалы дифманометра составит:

$$\frac{l_{\Pi}}{l} = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\rho_{\max}}. \quad (8-3)$$

Тогда при изменении плотности, например, от 1000 до 1500 кг/м<sup>3</sup> шкала плотности займет 1/3 длины шкалы дифманометра. Если же плотность колеблется в диапазоне 950—1000 кг/м<sup>3</sup>, то шкала плотности разместится на 1/20 длины шкалы дифманометра. Следовательно, участок, занимаемый шкалой плотности, получается очень коротким, что снижает точность измерений. Для получения необходимой точности применяют устройства компенсации балластного перепада давления, соответствующего минимальной плотности жидкости в измеряемом интервале и являющегося постоянной величиной для данного плотномера. При этом начало шкалы плотности совпадает с нулем шкалы динамометра.

Известны различные способы и устройства компенсации балластного перепада давления [34, 35]. Так, например, в двухмембранном плотномере (рис. 8-1) применяют дополнительный закрытый сосуд, доверху заполненный жидкостью известной плотности, в который погружены мембранные блоки (один над другим); верхний блок присоединен к верхнему датчику давления плотномера, а нижний — к минусовой полости дифманометра. Давление, воспринятое верхним блоком, передается через жидкость, заполняющую сосуд, нижнему блоку. При этом в дифманометре создается разность давлений

$$\Delta P = (h_1\rho_1 - h_2\rho_2)g,$$

где  $\rho_1$  — плотность исследуемой жидкости;  $h_1$  — расстояние по вертикали между датчиками давления;  $\rho_2$  — плотность вспомогательной жидкости;  $h_2$  — расстояние по вертикали между блоками.

Изменяя  $h_2$  или  $\rho_2$ , добиваются смещения нижнего предела измерений так, чтобы при наименьшей возможной плотности исследуемой жидкости показание дифманометра равнялось нулю.

Вместо компенсации балластного перепада давления можно использовать для измерений поплавковый дифманометр с безнулевой шкалой (с «подавленным нулем»). Для этого в дифманометр достаточно залить дополнительно такое количество уравновешивающей жидкости (ртути, масла), при котором стрелка устанавливается

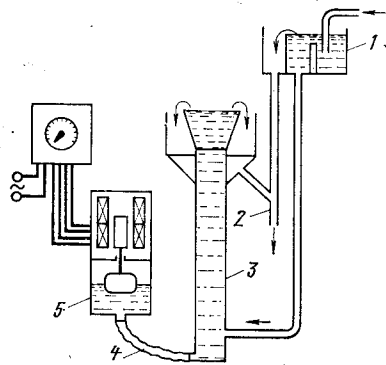


Рис. 8-2. Схема плотномера с сообщающимися сосудами.

1 — бак постоянного уровня; 2 — сливная труба; 3 — измерительный цилиндр; 4 — гибкий шланг; 5 — поплавковый манометр.

на начальной отметке шкалы, когда перепад давления соответствует минимальной плотности исследуемой жидкости.

На рис. 8-2 показан двухжидкостный гидростатический плотномер с сообщающимися сосудами. Исследуемая жидкость поступает в измерительный цилиндр снизу из бака постоянного уровня. В цилиндре также поддерживается постоянный уровень и, следовательно, постоянное давление. Поплавковый манометр, подключенный к цилиндру, заполнен уравновешивающей жидкостью (например, ртутью), которая не смешивается с исследуемой жидкостью. Искомая плотность определяется высотой столба уравновешивающей жидкости в манометре.

Изменяя высоту цилиндра и применяя набор лекал с различным перемещением сердечника индукционной катушки вторичного прибора, можно пользоваться одним и тем же комплектом манометра со вторичным прибором для различных диапазонов измерения плотности.

Вторая разновидность плотномеров этой же группы основана на уравновешивании столба жидкости постоянной высоты столбом вспомогательной жидкости (рис. 8-3) [83]. Сигнал изменения плотности поступает в схему компенсации, выход которой подключен к камере с изменяющимся столбом вспомогательной жидкости. Изменение последнего вызывает изменение давления на мем-

брану, прямо пропорциональное давлению контролируемой жидкости, до компенсации перемещения мембраны. Вторичный прибор регистрирует давление, под действием которого перемещение мембраны, вызванное изменением плотности, компенсируется изменением высоты столба вспомогательной жидкости. Изменением длины рабочей трубки и плотности вспомогательной жидкости можно изменять диапазон измерений. Термокомпенсатор представляет собой два сильфона, помещенных один в другой, причем подвижные торцы их соединены в виде тороида. Пещость между сильфонами заполняется жидкостью с требуемым коэффициентом объемного расширения. Поскольку поверхности термокомпенсатора омываются контролируемой жидкостью, инерционность системы термокомпенсации незначительна. В результате изменения объема жидкости в межсильфонном пространстве термокомпенсатор удлиняется, изменяя объем жидкости в рабочей камере.

Основные технические характеристики компенсационного плотномера: диапазон измерений 700—2500 кг/м<sup>3</sup>; диапазон шкалы — от 80 до 400 кг/м<sup>3</sup>; погрешность ±1,5% диапазона шкалы. Мембрана может быть

расположена и горизонтально, закрывая снизу пещость вертикальной камеры со вспомогательной жидкостью [81]. Камера находится в корпусе и обтекается снизу вверх потоком исследуемой жидкости. Равенство высот столбов обеих жидкостей обеспечивается специальным мембранным устройством.

Изображенный на рис. 8-4 плотномер для газов основан на сравнении разностей давлений контролируемого

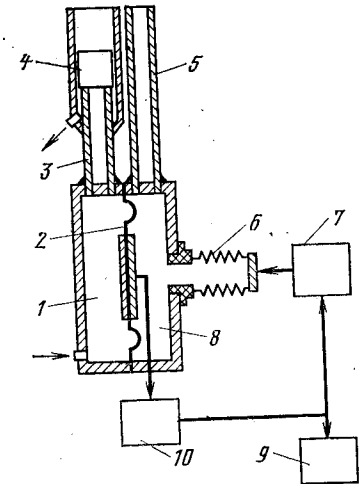


Рис. 8-3. Гидростатический плотномер с уравновешиванием столбов жидкостей.

1 — рабочая камера; 2 — мембрана; 3 — рабочая трубка; 4 — термокомпенсатор; 5 — компенсационная трубка; 6 — сильфон; 7 — исполнительный механизм; 8 — камера со вспомогательной жидкостью; 9 — вторичный прибор; 10 — пневмообразователь.

и вспомогательного газов в верхней и нижней частях столбов равной высоты [221]. Внутри вертикального герметичного корпуса 3, по которому протекает контролируемый газ, укреплена высокая (около 1 м) колонка 2, наполненная газом с известной плотностью. Сверху и снизу в колонку вмонтированы датчики разности давлений 4 и 5, выполненные в виде мембран, на которых укреплены кремниевые транзисторы. Сильфон 1, присоединенный к колонке, служит для максимально возможного выравнивания давлений по обе стороны датчика 5 (емкость сильфона значительно больше емкости колонки). Датчики включены в измерительную схему, выходной сигнал которой пропорционален искомой плотности

$$\rho = \frac{\Delta P_4 - \Delta P_5}{gh} + \rho_{в.г.} \quad (8-4)$$

где  $\Delta P_4$ ,  $\Delta P_5$  — разность давлений соответственно на нижнем и верхнем датчике;  $\rho_{в.г.}$  — плотность вспомогательного газа.

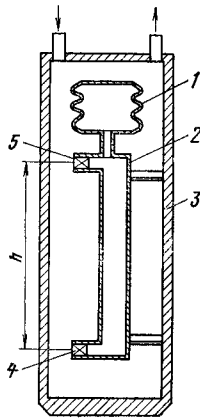


Рис. 8-4. Мембранный гидростатический плотномер для газов.

По принципиальной схеме, показанной на рис. 8-4, выполняют также дифференциальные плотномеры для непрерывных измерений, основанные на измерении разности статических давлений двух одинаковых по высоте столбов газов (измеряемого и контрольного), подаваемых с малой скоростью. В приборе на рис. 8-5,а имеются колонка 23, в которой образуются столбы газа и воздуха, и колокольный дифманометр 8 с электрической силовой компенсацией.

Колонка состоит из двух концентрических труб 16 и 17, окруженных цилиндрическим корпусом 18, образующим воздушную рубашку. По внутренней трубе протекает испытуемый неагрессивный газ, а по кольцевому каналу между трубами 16 и 17 — осушенный и очищенный воздух.

Требуемая скорость газа и воздуха поддерживается при помощи капилляров 24, 14 и 15 в дозирующей блоке 12. Постоянное давление перед капиллярами создается маностатами 26 и 13 барботажного типа

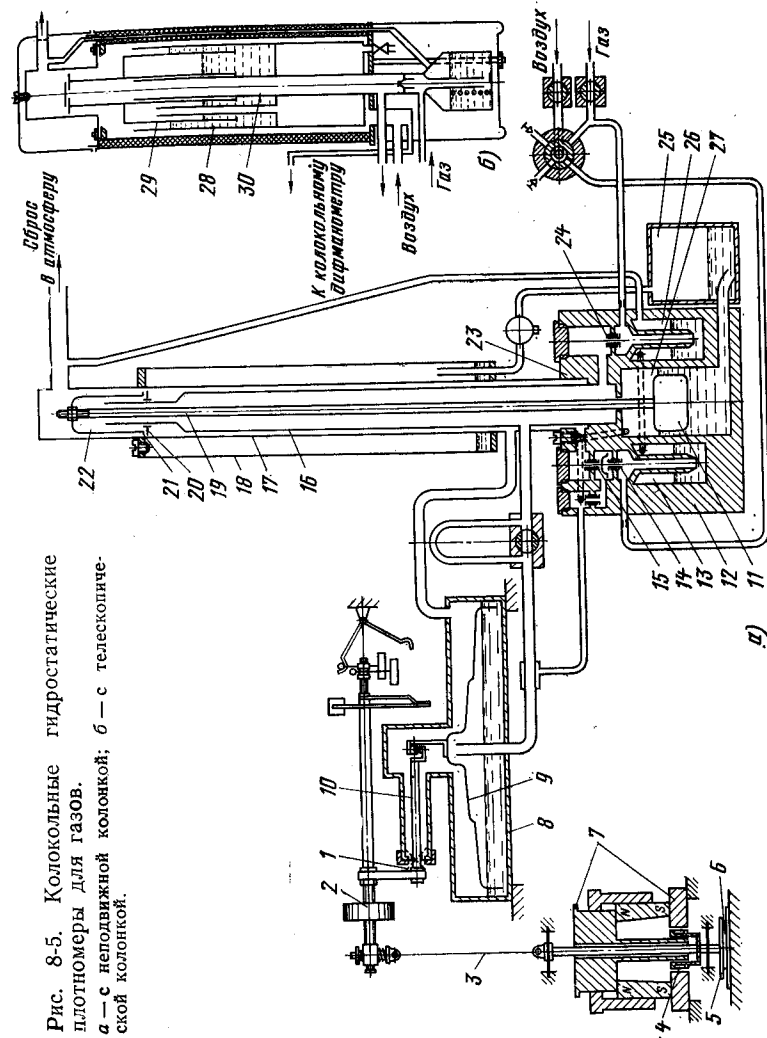


Рис. 8-5. Колокольные гидростатические плотномеры для газов.  
а — с неподвижной колонкой; б — с телескопической колонкой.



поддерживающими избыточное давление примерно  $30 \text{ кгс/м}^2$  ( $300 \text{ Па}$ ). На верхний участок трубы 16 надет легкий колпачок 22 с кольцевой щелью 21, образующейся между нижним торцом колпачка и тонкой шайбой 20, связанной с ним. Колпачок вместе с шайбой может свободно перемещаться в вертикальном направлении. Смещение газа происходит на уровне щели 21, вследствие чего верхняя граница и высота столбов газа и воздуха определяются высотой расположения колпачка 22. Последний связан тонким стержнем 19 с поплавком 11, плавающим в силиконовой жидкости, которой залиты поплавок камера 27 и бачок 25. Верх бачка соединен с воздушной рубашкой колонки. При повышении температуры или понижении давления воздуха, окружающего колонку, увеличивается объем воздуха, запертого в рубашке, и жидкость перетекает из бачка в поплавок камеру, что влечет за собой перемещение поплавка 11 вверх и увеличение высоты столбов газа и воздуха. При обратных знаках изменений высота столбов уменьшается. Таким образом измеряемая плотность приводится к нормальному состоянию.

Импульсные трубки дифманометра 8 присоединены к колонке на уровне нижней границы столбов газа и воздуха. Колокол 9 подвешен к рычагу 10, установленному на упругой опоре 1. Левое плечо рычага 10 несет на себе настроечный груз 2 и связано тягой 3 с силовой катушкой 4 магнитоэлектрического узла 7 обратной связи и с индикатором рассогласования, состоящим из экрана 5 и генераторной катушки 6. Катушка 6 подключена к входу, а катушка 4 — к выходу электронной схемы, изменяющей силу постоянного тока, который протекает через катушку 4, при изменении положения экрана 5 относительно катушки 6. Ток через катушку 4 является выходным сигналом датчика.

Подвижная система дифманометра первоначально уравнивается грузом 2. При увеличении плотности газа на колоколе возникает дополнительное усилие, приближающее экран 5 к катушке 6, и электронная схема изменяет выходной ток таким образом, что изменение усилия взаимодействия между катушкой 4 и магнитным полем магнитной системы компенсирует дополнительное усилие на колоколе. Благодаря этому изменения выходного сигнала пропорциональны изменениям плотности газа. Отсчет плотности производят по вторичному

прибору — миллиамперметру постоянного тока (выходной сигнал  $0-5 \text{ мА}$ ).

Основные технические характеристики плотномера: диапазон измерений  $0-3 \text{ кг/м}^3$ ; диапазон шкалы — от  $0,2$  до  $1 \text{ кг/м}^3$ ; давление газа  $100-300 \text{ кгс/м}^2$  ( $1-3 \text{ кПа}$ ); расход воздуха  $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; погрешность  $\pm 0,01 \text{ кг/м}^3$ .

На рис. 8-5,б представлена схема колокольного плотномера повышенной точности, который можно применять и для агрессивных газов. Колонка 30 выполнена телескопической, ее верхняя часть соединена с колоколом 29, погруженным в резервуар 28 с затворной жидкостью так, что высота колонки изменяется обратно пропорционально плотности газа в зависимости от его температуры и давления. В качестве затворной жидкости, устойчивой по отношению к любым газам, хорошо зарекомендовало себя силиконовое масло. Разность давлений в плотномере измеряется специальным колокольным дифманометром с пневматической обратной связью, обладающим коэффициентом усиления до 2000. Это позволило уменьшить высоту колонки до  $400 \text{ мм}$  и обеспечить порог чувствительности  $0,1 \text{ кгс/м}^2$  ( $1 \text{ Па}$ ), что эквивалентно плотности  $0,001 \text{ кг/м}^3$ . Погрешность показаний прибора  $\pm 0,004 \text{ кг/м}^3$ .

Применение пневмоповторителей и элементов пневмоавтоматики расширяет возможности построения современных схем гидростатических плотномеров [41, 49]. В частности, важное достоинство плотномера с пневмоповторителями состоит в том, что в нем может быть исключено влияние колебаний уровня жидкости на результат измерения [41].

Высокой чувствительностью обладает гидростатический струйный плотномер [203], схема которого построена из четырех струйных усилителей. На входы первого усилителя поступают сигналы давления с двух различных уровней жидкости в сосуде. Выходной сигнал этого усилителя, пропорциональный плотности жидкости, усиливается в двух последующих усилителях. Четвертый усилитель сравнивает полученный сигнал с контрольным и выдает сигнал, пропорциональный их разности.

Значительное распространение получили гидростатические плотномеры упомянутой выше второй группы — с непрерывной продувкой инертного газа (или воздуха) через исследуемую жидкость. Такие плотномеры будем называть для краткости пневмометрическими. По по-

груженной в жидкость вертикальной трубке непрерывно пропускают газ (воздух) так, что он выходит из трубки отдельными пузырьками. Давление газа при неизменной глубине погружения трубки и постоянном уровне жидкости прямо пропорционально плотности жидкости, так как давление столба жидкости, которое должны преодолеть пузырьки газа, пропорционально ее

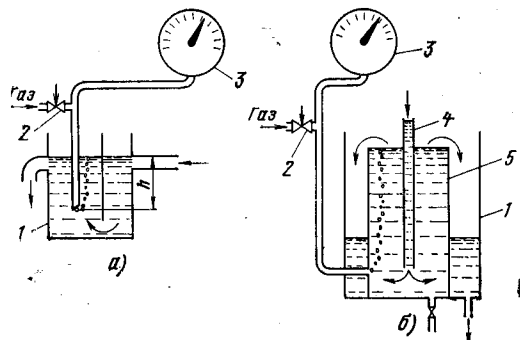


Рис. 8-6. Однотрубные пневмометрические плотномеры. *a* — сливное отверстие сверху; *б* — сливное отверстие внизу; 1 — резервуар; 2 — вентиль для регулирования расхода газа; 3 — манометр; 4 — впускная труба; 5 — переливной сосуд.

плотности. Следовательно, давление газа служит мерой искомой плотности. Достоинства этих плотномеров: измерительная часть прибора не погружается в жидкость; возможно применение для вязких, загрязненных, кристаллизующихся и агрессивных жидкостей; удобство передачи показаний на расстояние.

Типовая схема однотрубного пневмометрического плотномера показана на рис. 8-6, *a*. Род газа выбирают в зависимости от свойств исследуемой жидкости. Расход его должен быть небольшим, но постоянным, так как колебание расхода вызывает дополнительную погрешность измерений. В начальной точке шкалы манометра давление должно быть равно давлению столба жидкости при минимальной ее плотности. Необходимость применения манометра с безнулевой шкалой является одним из недостатков рассматриваемой схемы.

В однотрубном плотномере согласно схеме на рис. 8-6, *б* исследуемая жидкость по вертикальной трубке вводится в цилиндрический сосуд, переливается через его края и поступает в наружный резервуар, откуда вытекает по сливной трубе.

Два соединенных вместе однотрубных плотномера служат для измерения по принципу сравнения плотностей двух жидкостей — исследуемой и вспомогательной с известной плотностью (рис. 8-7). В качестве указателя плотности служит дифманометр, отрегулированный таким образом, чтобы стрелка стояла против начальной отметки шкалы, когда плотности обеих жидкостей одинаковы. Сосуд обычно снабжается устройством, исключающим испарение вспомогательной жидкости или восполняющим ее потери.

Если постоянство уровня жидкости не может быть обеспечено, применяют пневмометрический плотномер, выполненный по дифференциальной схеме (рис. 8-8, *a*). В этом случае справедливо уравнение (8-1). Однако данному плотномеру присущ тот же недостаток, что и дифференциальному плотномеру с непосредственным измерением давления (рис. 8-1). Более высокую точность обеспечивает схема с компенсацией балластного перепада давления при помощи сосуда, заполненного вспомогательной жидкостью известной плотности, который включен в линию более короткой из двух трубок, подводящих газ (рис. 8-8, *б*). Как видно из схемы, показание дифманометра определяется зависимостью

$$\Delta P = [\rho_1 - (\rho_2 h_2 + \rho_0 h_0)] g = (\rho h - \rho_0 h_0) g. \quad (8-5)$$

Если  $h_0 = h$  и в качестве вспомогательной использовать такую жидкость, плотность  $\rho_0$  которой равна нижнему пределу измерений  $\rho_{\min}$ , то  $\Delta P = 0$  при  $\rho = \rho_{\min}$ , т. е. диапазон измерений плотности будет растянут по всей шкале дифманометра. Уровень вспомогательной жидкости должен поддерживаться постоянным.

При измерении плотности небольшого количества жидкости, когда невозможно создать достаточную разность глубин погружения импульсных трубок, в жид-

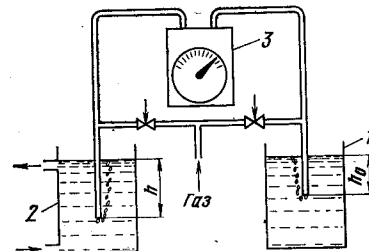


Рис. 8-7. Двухжидкостный пневмометрический плотномер. 1 — сосуд со вспомогательной жидкостью; 2 — сосуд постоянной уровня для исследуемой жидкости; 3 — дифманометр.

кость погружают на одинаковую глубину две одинаковые трубки равной длины (рис. 8-8, в) [222]. Конец одной трубки закрыт выступом поплавка, образуя подобие дросселя. Для компенсации выталкивающей силы поплавка, являющейся функцией искомой плотности жидкости, в задросселированной трубке должно быть создано дополнительное давление газа. Разность давлений газа в трубках служит мерой плотности. Градуировка прибора производится по жидкости с известной плотностью.

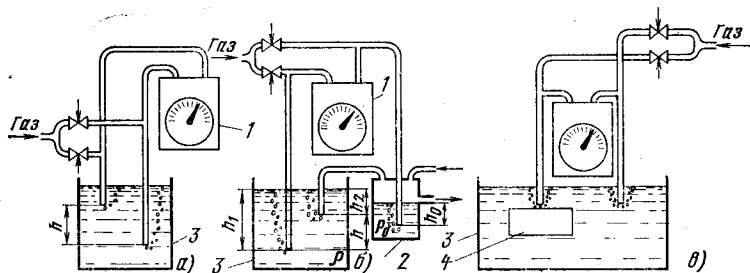


Рис. 8-8. Дифференциальные пневмометрические плотномеры. а — одножидкостный; б — двухжидкостный; в — с одинаковой глубиной трубок; 1 — дифманометр; 2 — сосуд со вспомогательной жидкостью; 3 — сосуд с исследуемой жидкостью; 4 — поплавок.

Исследование процесса образования пузырька воздуха на конце трубки, погруженной в жидкость, показало, что оптимальный диаметр импульсных трубок следует определить с учетом изменения максимального капиллярного давления и амплитуды колебания давления воздуха внутри трубок в процессе образования и отрыва пузырьков [82]. Капиллярное давление значительно при диаметре 1—2 мм, а начиная с 4 мм оно невелико и при дальнейшем увеличении диаметра изменяется мало. Поэтому оптимальный диаметр выходного отверстия трубки находится в пределах 4—8 мм, тогда максимальное капиллярное давление незначительно и составляет 5—7 кгс/м<sup>2</sup> (50—70 Па). Выходящие из трубки пузырьки не деформируются и имеют форму полусферы. Применение трубок большего диаметра нецелесообразно: это приводит к увеличению расхода газа, времени запаздывания и амплитуды колебания давления.

Так как показания плотномера искажаются, если скорость газа в импульсных трубках разная, необходимо, чтобы из трубок выходило одинаковое число пузырьков в единицу времени (10—15 за 1 с).

Плотномеры с импульсными трубками, имеющими концы конической формы, работают более стабильно, чем с трубками, имеющими прямой торцовый срез. Во избежание закупорки трубок при измерении плотности вязких или кристаллизующихся жидкостей рекомендуется [270] снабжать опускаемый в жидкость конец трубки наконечником в виде патрубка большего диаметра, косо срезанного в нижней части и закрытого наклонным дном. Отверстие для выхода пузырьков газа из трубки в жидкость выполняется в боковой стенке наконечника в самой нижней ее части у места сопряжения с наклонным дном.

Пневмометрические плотномеры находят применение и для измерения плотности псевдооживленного слоя. Однако в данном случае нельзя подавать в импульсные трубки посторонний газ, так как он вступает в реакцию и нарушает протекающий в аппарате процесс. Поэтому предложено [161] определять разность давлений, создаваемых в трубках восходящим потоком рабочего газа, который подается для создания псевдооживленного слоя.

Следует отметить, что у всех дифференциальных пневмометрических плотномеров показания в некоторой степени зависят от уровня жидкости, избыточного давления над ней и от давления газа, подводимого к прибору. Для устранения влияния указанных факторов в исследуемую жидкость вводят третью трубку, погружаемую глубже основных. Эта трубка играет роль автоматического регулятора давления подводимого газа [35].

Различные конструкции гидростатических плотномеров для жидкостей и применяемые в них устройства термокомпенсации описаны в [34, 35, 80, 83, 107]. Гидростатические плотномеры обладают сравнительно низкой точностью: погрешность, отнесенная к диапазону шкалы, достигает  $\pm (1,5—2,5) \%$ .

Представляет интерес сочетание пневмометрического и поплавкового плотномеров. Такой комбинированный плотномер обеспечивает высокую чувствительность, свойственную поплавковым приборам, и простоту дистанционной передачи показаний, характерную для

пневмометрических приборов. Он особенно пригоден для измерения плотности жидкостей с агрессивными парами при малых расходах и работе во взрывоопасных условиях [16]. Жидкость (рис. 8-9) поступает по трубе 3 в сосуд 2 постоянного уровня. Из сосуда 2 избыток жидкости перетекает в сливной сосуд 8, а основной поток по трубе 1 — в проточный сосуд 14 и затем через верхнюю его кромку снова в сливной сосуд 8. В проточном

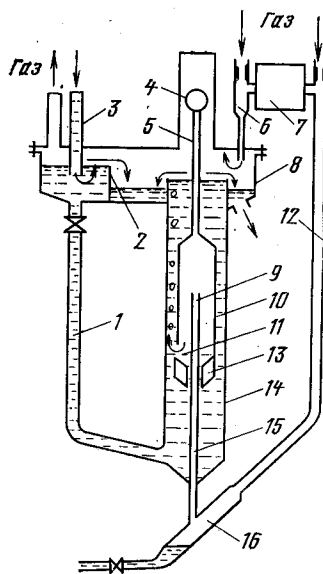


Рис. 8-9. Поплаково-пневмометрический плотномер.

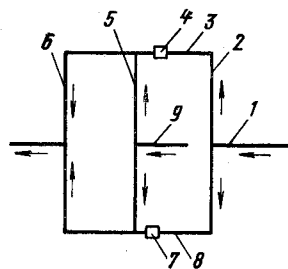


Рис. 8-10. Гидростатический скоростной плотномер для газов.

сосуде расположена вертикальная трубка 15 с отверстием 9, через которое газ, поступающий из импульсной линии 12, протекает в полость подвижного колокола 10 и далее через отверстие 11 в жидкость. О плотности судят по показанию дифманометра 7.

При изменении плотности колокол перемещается до тех пор, пока изменение объема жидкости, вытесненной стержнем 5, не приведет подвижную систему к новому положению равновесия. При этом изменение давления в полости колокола, вызванное изменением глубины его погружения, во много раз больше, чем изменение давления за счет изменения только плотности жидкости

(при неизменной глубине погружения колокола). Груз 4 служит для небольших изменений пределов измерения, груз 13 — для значительных изменений пределов измерения, повышения устойчивости подвижной системы, а также для направления движения колокола и предотвращения его трения о стенки сосуда 14 или трубки 15. Наклонный сосуд 16 предназначается для повышения надежности измерений при случайном попадании жидкости в трубу 15. Путем плавного открытия вентиля поплавшую жидкость удаляют без нарушения процесса измерения. Трубка 6 служит для компенсации падения давления газа в трубке 15.

Оптимальный объем плотнмера, заполненного жидкостью, 50 см<sup>3</sup>, а объем поплавковой системы — 10 см<sup>3</sup>. При расходе 0,002 м<sup>3</sup>/ч и более погрешность измерения составляет ±1 кг/м<sup>3</sup>.

К дифференциальным гидростатическим плотномерам с косвенным измерением давления относится также группа приборов для измерения плотности газа (пара), в которых о давлении судят по скорости потока газа. Типовая схема гидростатического скоростного плотнмера показана на рис. 8-10 [193, 204]. Две вертикальные колонки 2 и 5 соединены между собой горизонтальными трубками 3 и 8, продолжения которых подключены к вертикальной трубке 6 с боковым отводом. Испытуемый газ поступает по трубке 9 посередине колонки 5 и разделяется на два потока — вверх и вниз. Аналогичным образом по трубке 1 в колонку 2 подается контрольный газ. После смешения в левых частях трубок 3 и 8 газы отводятся по трубке 6. Если плотности обоих газов одинаковы, то система находится в динамическом равновесии: давления в колонках одинаковы, скорости потоков в трубках 3 и 8 также одинаковы. В случае разных плотностей соотношение скоростей в трубках 3 и 8 зависит от разности плотностей газов. Если, например, плотность испытуемого газа больше плотности контрольного газа, то вследствие увеличенного давления столба газа в колонке 5 скорость контрольного газа в трубке 3 будет превышать его скорость в трубке 8. Эта разность скоростей фиксируется с помощью датчиков 4 и 7 (термоанемометрических, ионизационных и др.), включенных в мостовую схему. Выходной сигнал моста пропорционален плотности испытуемого газа.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПЛОТНОМЕРЫ

Кинетическая энергия  $E$  потока вещества с массой  $m$  и плотностью  $\rho$ , движущегося со скоростью  $w$ , определяется известным соотношением

$$E = \frac{mw^2}{2} = \frac{V\rho w^2}{2}, \quad (9-1)$$

где  $V$  — объем.

Следовательно, величина  $\frac{\rho w^2}{2} = P$ , представляющая со-

бой динамическое давление, является мерой энергии (при известном объеме). Таким образом, если двум различным газам с плотностью  $\rho_1$  и  $\rho_2$  сообщить одинаковую скорость, то

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (9-2)$$

Уравнение (9-2) используется для измерения относительной плотности газа при помощи прибора, состоящего из двух идентичных, расположенных одна над другой камер, через одну из которых непрерывно проходит исследуемый газ, а через другую — воздух. В каждой камере установлены на отдельных осях турбинка 1 и

противолежащее ей лопастное колесо 2 (рис. 9-1, а). Турбинка при вращении сообщает газу (воздуху) определенную энергию, которую (как и в аэродинамической муфте), воспринимает колесо. Электродвигатель приводит во вращение турбинки с одинаковой скоростью, но

Рис. 9-1. Турбинный плотномер для газов.

а — рабочая камера; б — измерительный механизм.

в противоположных направлениях, при этом они действуют как вентиляторы, засасывая в камеры соответственно газ и воздух. Действующие на лопастные колеса вращающие моменты прямо пропорциональны плотностям газов и противоположны по направлению. Оси ко-

лес соединены рычажным механизмом 3 (рис. 9-1, б), выходное звено которого поворачивается на угол, соответствующий отношению моментов, т. е. плотности. Поворот происходит до тех пор, пока не восстановится равновесие системы. Выходное звено механизма жестко связано с указывающей стрелкой 4 и пером записывающего устройства. Благодаря высокой частоте вращения (3000 об/мин) турбинки и колеса исключается влияние вязкости газов. Шкалу градуируют по газам с известной плотностью. Погрешность измерений  $\pm 1,5\%$  диапазона шкалы.

Аналогичным образом измеряют плотность жидкостей [228]. На валу синхронного электродвигателя с постоянной скоростью вращения установлена турбинка с винтовыми лопастями, охваченная цилиндрической гильзой, которая укреплена на валу, соосном с валом турбинки. На ступице гильзы имеются наклонные лопасти, с помощью которых вращение турбинки передается гильзе; вал гильзы закручивает пружину. Угол поворота гильзы, зависящий от плотности жидкости, воспринимает магнитоэлектрический датчик.

Описанный выше принцип измерения реализуется и другими способами. Например, две одинаковые радиально-лопастные турбинки посажены на общий вал, приводимый во вращение электродвигателем, и динамическое давление потока на выходе из камеры каждой турбинки воспринимается напорной трубкой. Отводы от трубок соединены с двухколольным прибором, который измеряет отношение давлений (рис. 9-2) и, следовательно, показывает относительную плотность согласно выражению (9-2). Действительно,  $b/a = P_1/P_2 = \rho_1/\rho_2$ . Если, например, давление  $P_1$  возрастет вследствие увеличения плотности  $\rho_1$ , то рычажный механизм со стрелкой повернется вправо, плечо уменьшится, а  $b$  увеличится и система снова уравновесится. В зависимости от плотности газа значение  $P$  колеблется от 50 до 80 кгс/м<sup>2</sup>

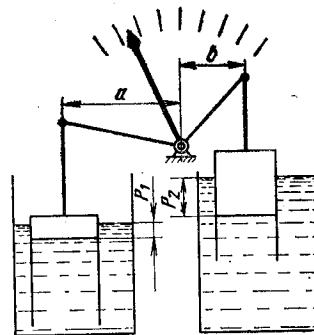


Рис. 9-2. Двухколольный измеритель отношения давлений.

(0,5—0,8 кПа). Погрешность этого плотномера  $\pm 1\%$  диапазона шкалы.

Представляет интерес гидродинамический плотномер для жидкостей, представляющий собой сочетание турбинного расходомера и поршневого манометра с дифманометром [162]. Искомая плотность определяется из зависимости

$$\rho = A \frac{P}{\omega^2} \quad (9-3)$$

где  $A$  — константа;  $P$  — динамическое давление потока, измеряемое дифманометром;  $\omega$  — частота вращения турбинки.

Значительное развитие получил центробежный принцип измерения плотности. В применении к газам он проще всего реализуется путем вращения трубки, заполненной газом, относительно одного ее конца, при этом возникает разность давлений на концах трубки

$$\Delta P = \frac{1}{2} \omega^2 l^2 \rho, \quad (9-4)$$

где  $\omega$  — частота вращения;  $l$  — длина трубки;  $\rho$  — средняя плотность газа.

Практически такой плотномер выполнен в виде измерительной камеры (рис. 9-3,а) [274], внутри которой непрерывно вращается горизонтальная трубка; газ входит в трубку через отверстие 1, а выходит из нее через отверстия 2 и 3. Полая вертикальная ось 4 этой трубки получает вращение при помощи магнитной муфты. Верхний предел измерений составляет  $130 \text{ кг/м}^3$ ; соответствующая разность давлений  $0,13 \text{ кгс/см}^2$  ( $12,5 \text{ кПа}$ ). Погрешность показаний  $\pm 0,5\%$ . Наибольшее давление  $140 \text{ кгс/см}^2$  ( $14 \text{ МПа}$ ). Прибор требует постоянного по частоте питания сети: сдвиг частоты на  $\pm 0,1 \text{ Гц}$  приводит к изменению показания на  $\pm 0,3\%$ .

Другая реализация того же принципа представляет собой небольшой центробежный вентилятор с приводом от синхронного электродвигателя с большой скоростью вращения [223, 224]. Перепад давления в вентиляторе является мерой плотности газа. Основные характеристики прибора: частота вращения  $4500\text{—}12\,600 \text{ об/мин}$ ; верхний предел измерения соответственно  $20\text{—}400 \text{ кг/м}^3$ ; перепад давления соответственно  $900\text{—}2300 \text{ кгс/м}^2$  ( $9\text{—}$

$23 \text{ кПа}$ ); диапазон шкалы  $1:5$ ; погрешность (лучших образцов)  $\pm 0,5\%$  верхнего предела измерений.

Разновидность этого прибора [233] содержит центрифугу в виде диска, вращающегося с постоянной скоростью вокруг горизонтальной оси. В обоих торцах диска выполнены круговые полости; в эти полости через продольные каналы в ступицах диска поступают контролируемый газ и воздух. Газ и воздух выходят через

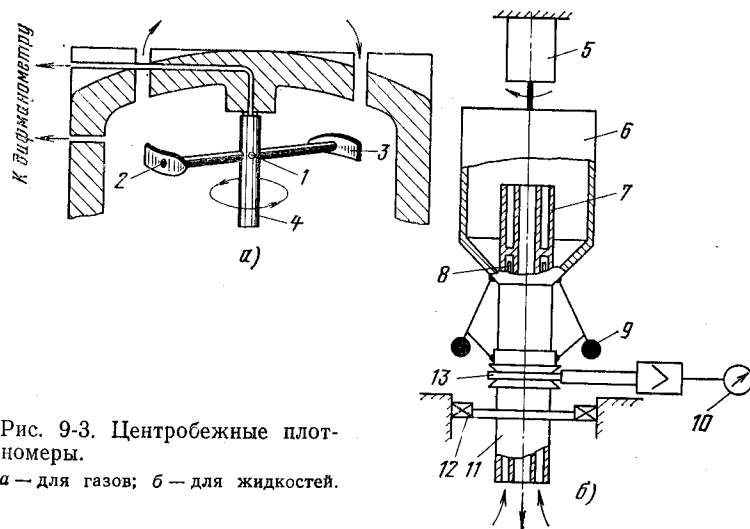


Рис. 9-3. Центробежные плотномеры.

а — для газов; б — для жидкостей.

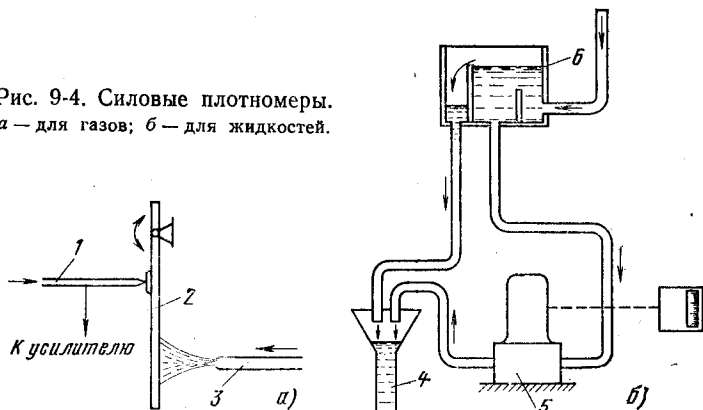
периферийные отверстия. Измеряемая дифманометром разность давлений на входе в диск и выходе из него пропорциональна средней плотности газа в круговой полости диска. Измерение ведется путем сравнения плотностей газа и воздуха. Погрешность измерения относительной плотности  $\pm 0,001$ .

На рис. 9-3,б показан центробежный плотномер для жидкостей [172]. Жидкость поступает в измерительный сосуд 6 через окна 8 в трубке 11 и отводится через патрубков 7. Трубка 11 установлена в подшипнике 12. Сосуд, жестко связанный с трубкой 11, приводится во вращение двигателем 5 постоянного тока с последовательным возбуждением. Скорость вращения сосуда с определенным объемом жидкости обратно пропорциональна ее плотности. Изменение плотности приводит к измене-

нию нагрузки на вал двигателя, что вызывает изменение скорости вращения сосуда, отклонение шаров центростремительного регулятора 9 и изменение нагрузки на пьезоэлектрический датчик 13, сигнал которого фиксируется указателем 10.

Одно из направлений развития гидродинамических плотномеров связано с созданием приборов, основанных на зависимости между силой удара струи вещества о какую-либо жесткую преграду и плотностью этого вещества. Условимся называть такие плотномеры силовыми.

Рис. 9-4. Силовые плотномеры.  
а — для газов; б — для жидкостей.



Сила  $F$  действия струи вещества на перпендикулярно расположенную плоскую пластинку определяется выражением

$$F = S\omega^2\rho, \quad (9-5)$$

где  $S$ ,  $\omega$  — площадь поперечного сечения и скорость струи;  $\rho$  — плотность вещества.

Следовательно, при постоянной скорости истечения газа или жидкости перемещение пластины под действием силы удара струи является мерой плотности вещества. В пневматическом силовом плотномере для газов (рис. 9-4,а) перемещение пластинки 2 при отклонении ее струей газа из рабочего сопла 3 преобразуется соплом-заслонкой 1 в давление сжатого воздуха [154]. Пневматический сигнал после усиления регистрируется самопишущим манометром. Погрешность показаний плотномера  $\pm 1\%$  верхнего предела измерений.

Силовой плотномер для жидкостей, работающий при весьма малых значениях расхода (рис. 9-4,б) [164], основан на использовании силового расходомера 5, в который поступает жидкость из бака постоянного уровня 6, обеспечивающего стабилизацию расхода. Жидкость из расходомера и переливного устройства направляется в линию 4.

Для измерения плотности пульпы и тяжелых суспензий в широком диапазоне до  $2500 \text{ кг/м}^3$  применяют силовые плотномеры, в которых используется свободно падающий поток. Наклонная или горизонтальная пластина, воспринимающая силу удара пульпы, прикреплена к концу горизонтального рычага, который воздействует на силоизмеритель, преобразующий силу в электрический сигнал [101, 226]. Существуют также плотномеры для пульпы с вертикально установленной пластиной, как на рис. 9-4,а [86].

К гидродинамическим плотномерам относится и группа приборов, которые мы будем называть струйными.

Представляет интерес струйный плотномер для жидкостей и газов, описанный в [281]. Поток вспомогательной среды разделяется на две струи, которые под одинаковым давлением подаются в сопла, расположенные в сравнительной и измерительной камерах. В герметичной сравнительной камере напротив сопла на определенном расстоянии находится трубка, воспринимающая динамическое давление. Открытая измерительная камера расположена в контролируемой среде, и в ней против сопла также находится трубка, воспринимающая динамическое давление. Разность давлений в трубках является мерой плотности контролируемой среды. Разработанный прибор для газа обладает следующими характеристиками: диапазон измерений — от  $0,083$  до  $8,3 \text{ кг/м}^3$ ; температура — до  $540^\circ\text{C}$ ; давление — до  $20 \text{ кгс/см}^2$  ( $2 \text{ МПа}$ ); погрешность  $\pm 0,1\%$ ; избыточное давление сравнительной среды — около  $3 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,3 \text{ МПа}$ ); расход — до  $2 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Измерительную камеру устанавливают непосредственно внутри технологического трубопровода с внутренним диаметром не менее  $150 \text{ мм}$  или снаружи трубопровода в специальном кожухе с отбором контролируемой среды.

Повышенной чувствительностью и линейной статической характеристикой обладает струйный плотномер для жидкостей и газов, представляющий собой пневматиче-

ский (гидравлический) мост из четырех турбулентных сопротивлений, образующих два делителя давления (рис. 9-5) [109]. В каждом делителе (т. е. в смежных плечах моста) диаметры дросселей разные, в противоположных плечах диаметры дросселей равны. С изменением плотности среды изменяются гидравлические сопротивления дросселей, что в свою очередь вызывает соответственное изменение перепада давления, снимаемого с междроссельных камер обоих делителей. Изменение перепада записывается регистрирующим прибором.

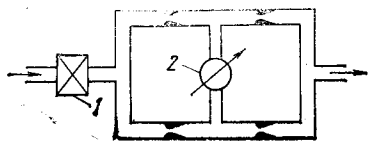


Рис. 9-5. Струйный плотномер. 1 — задатчик расхода; 2 — регистрирующий прибор.

Струйный плотномер для газов, выполненный по схеме неравновесного пневматического моста [153], определяет разность плотностей испытуемого и вспомогательного газов. Погрешность такого прибора  $\pm 2,5\%$  диапазона шкалы.

Струйный плотномер для газов, выполненный по схеме неравновесного пневматического моста [153], определяет разность плотностей испытуемого и вспомогательного газов. Погрешность такого прибора  $\pm 2,5\%$  диапазона шкалы.

## Глава десятая

### УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

Применение ультразвука для измерения плотности веществ является новым и перспективным направлением развития плотномеров. К ультразвуковым (УЗ) колебаниям относят такие колебания, частота которых находится за верхним пределом слышимых человеческим ухом звуков. Условно таким пределом считают частоту 20 кГц. Ультразвуковые колебания в материальной среде создают каким-либо колеблющимся телом, соприкасающимся с этой средой. Скорость  $c$  распространения УЗ-волн в жидкостях и газах определяется уравнением [103]

$$c = (\sqrt{\beta_{ад} \rho})^{-1}, \quad (10-1)$$

где  $\beta_{ад}$  — коэффициент адиабатической сжимаемости среды.

Следовательно, измеряя тем или иным способом скорость распространения ультразвука в данной среде и считая коэффициент адиабатической сжимаемости по-

стоянным, определяют плотность среды. Скорость ультразвука в жидкостях колеблется в пределах от 800 до 2000 м/с. Например, для четыреххлористого углерода при температуре 20°C она составляет 938 м/с, для воды — 1484 м/с, для глицерина — 1920 м/с.

Плотность можно определять также путем измерения удельного акустического импеданса

$$Z = \rho c \quad (10-2)$$

и скорости ультразвука.

Распространение УЗ-волны в любой среде сопровождается поглощением звуковой энергии, что характеризуется коэффициентом поглощения  $\alpha$ . Интенсивность  $I$  ультразвука при прохождении расстояния  $l$  убывает по экспоненциальному закону [103]

$$I = I_0 e^{-2\alpha l}, \quad (10-3)$$

где  $I_0$  — начальная интенсивность.

Зависимость (10-3) также может быть использована для измерения плотности, например, пульп (гидросмесей) и суспензий: коэффициент поглощения зависит от концентрации твердых частиц в жидкости, т. е. от плотности.

Ультразвуковой метод измерения плотности обладает высокой чувствительностью, практически безынерционен и позволяет исключить контакт с испытуемой средой (т. е. работать, например, с агрессивными средами).

Как вытекает из изложенного, УЗ-плотномеры, чувствительные к скорости ультразвука, могут быть подразделены на скоростные, импедансные и импедансно-скоростные [22].

Скоростные УЗ-плотномеры предназначены в основном для однородных веществ, бинарных растворов, смесей жидкостей или газов. Среди этих плотномеров можно отметить следующие разновидности. Время-импульсный плотномер основан на измерении изменений времени распространения УЗ-колебаний в контролируемой среде в зависимости от изменений ее плотности. Ультразвуковые импульсы 1 (рис. 10-1,а) пропускают с заданным периодом  $T$  через среду и принятые импульсы преобразуют в электрические сигналы 2. Из детектированных сигналов 3 приемника формируют короткий стартовый импульс 4, которым запускают измеритель интервала времени. Одновременно с излучением осуществ-



ляют временную задержку на период  $\tau_0$  возбуждающего импульса 5 и формируют из него стопный импульс 6. В измерителе времени формируется импульс 7 длительностью  $\Delta\tau = \tau_0 - \tau$ , пропорциональный плотности среды; здесь же импульс 7 преобразуется в аналоговый или дискретный сигнал.

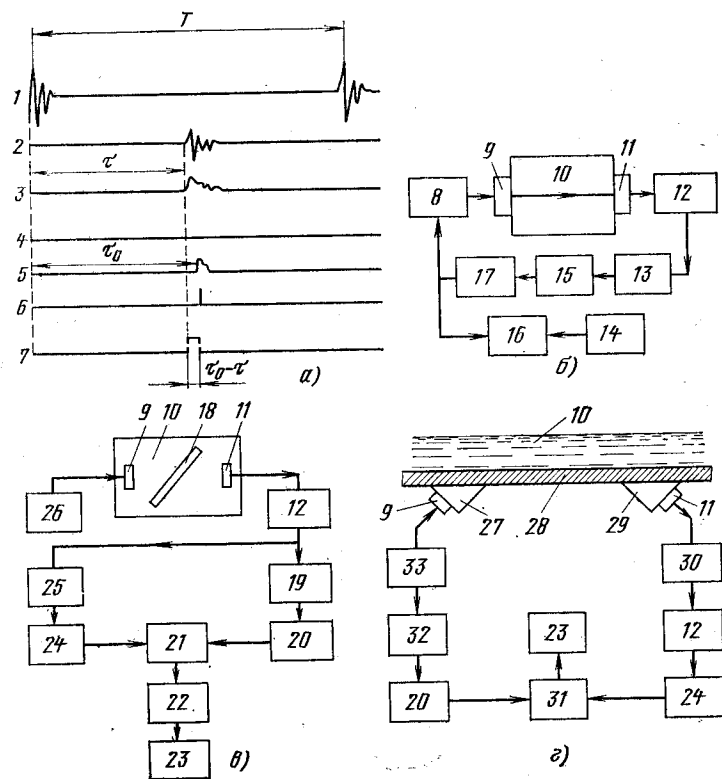


Рис. 10-1. Скоростные УЗ-плотномеры.

а — время-импульсный; б — автоциркуляционный; в — с акустическим фильтром; г — со скоростью реакцией волновода.

В автоциркуляционном плотномере определяют величину, обратную времени  $\tau$  распространения УЗ-колебаний в среде. Этой величиной является частота  $f$  автоциркуляции в электроакустически замкнутой системе (рис. 10-1, б), состоящей из УЗ-излучателя 9, контролируемой среды 10, УЗ-приемника 11, усилителя 12, детек-

тора 13, каскада запуска 15, блокинг-генератора 17, усилителя мощности 8. Изменение  $\Delta f$  частоты, пропорциональное изменению плотности среды относительно ее некоторого начального значения, определяется в измерительном блоке 16 по разности между частотой  $f$  автоциркуляции и частотой  $f_0$  источника 14 опорных импульсов.

Принцип действия фазового плотномера состоит в измерении фазы УЗ-колебаний (непрерывных или амплитудно-модулированных), прошедших через среду.

Интерферометрический плотномер построен на измерении длины волны УЗ-колебаний по акустическому резонансу столба среды заданной высоты, когда в нем укладывается целое число полувольт. Индикацию резонанса осуществляют по реакции генератора возбуждающего напряжения, поступающего на излучатель волны, или по напряжению принятого сигнала. Резонирование выполняется путем изменения высоты столба или частоты УЗ-колебаний. Второй из этих способов лучше: сравнительно просто обеспечивается выдача информации в дискретной форме.

Резонансный плотномер характеризуется тем, что в слое среды между двумя плоскопараллельными поверхностями, одна из которых граничит с излучателем, связанным с широкополосным электрическим генератором, а другая является отражателем, создается стоячая волна. Частота последней зависит от расстояния между указанными поверхностями и от плотности среды. При постоянстве расстояния плотность измеряют путем регистрации частоты самовозбуждения слоя среды.

В плотномере с акустическим фильтром (рис. 10-1, в) использован эффект изменения спектра УЗ-импульса при распространении его в контролируемой жидкости через размещенный в ней твердый слой. Генератор 26 электрическими видеопульсовыми сигналами возбуждает пьезоэлектрический излучатель 9, посылающий короткий импульс быстро затухающих УЗ-колебаний в жидкость. Для расширения спектра излучения пьезоэлемент излучателя жестко демпфирован (акустически). Излученный импульс, распространяясь в среде 10, достигает размещенной в ней наклонной пластины (фильтра) 18 и, проходя ее, изменяет длительность периода УЗ-колебаний во фронтальной части импульса в зависимости от плотности жидкости.

Ультразвуковой импульс после прохождения через акустически демпфированный приемник 11 усиливается усилителем 12 и поступает на ключевые каскады 25 и 19, соединенные соответственно с формирователями 24 и 20 импульсов запуска триггера 21. Благодаря тому что ключевые каскады выполнены с неодинаковыми временными отсечками, срабатывание формирователей происходит с запаздыванием относительно друг друга на период фронтальных колебаний принятого УЗ-импульса. В результате триггер вырабатывает прямоугольные электрические импульсы длительностью, равной периоду УЗ-колебаний, зависящему от плотности среды. Импульсы триггера поступают в интегрирующий блок 22, где преобразуются в напряжение постоянного тока, амплитуда которого пропорциональна плотности и измеряется регистрирующим блоком 23. Период УЗ-колебаний фронтальной части принятого УЗ-импульса не зависит от протяженности пути импульса в жидкости, что обеспечивает контроль независимо от акустической базы, а следовательно, и диаметра трубопровода.

Плотномер со скоростной реакцией волновода (рис. 10-1,2) основан на использовании эффекта изменения скорости распространения УЗ-колебаний вдоль твердого слоя от плотности жидкости, соприкасающейся с этим слоем. Твердым слоем обычно служит стенка 28 трубопровода или резервуара с контролируемой средой. Генератор 33 короткими импульсами электрического напряжения возбуждает акустическую головку 9, которая через преломляющую призму 27 излучает УЗ-импульс в стенку 28. Этот импульс распространяется по стенке со скоростью, пропорциональной плотности среды, и через преломляющую призму 29 поступает на акустическую головку 11, преобразующую его в импульс высокочастотного электрического напряжения. Принятый сигнал через высокочастотный фильтр 30, пропускающий колебания заданной частоты, подается на вход усилителя 12, а затем на формирующий каскад 24. Далее нормализованный электрический видеосигнал поступает на один из входов времяизмерительного блока 31. В качестве опорного импульса этого блока используется импульс генератора 33, который подается через блок задержки 32 и формирующий каскад 20. Длительность задержки устанавливается равной времени распространения (или близкой к нему) УЗ-импульса

по стенке при начальном значении плотности. Выходное напряжение блока 31, пропорциональное разности между временем распространения УЗ-сигнала и временем задержки опорного импульса, а также плотности среды, поступает в регистрирующий блок 23.

Импедансными плотномерами измеряют плотность однородных твердых и газообразных веществ, бинарных растворов и смесей жидкостей или газов. Применение этих плотномеров предполагает, что известна (или предварительно определена) зависимость между импедансом и плотностью вещества. На основании выражений (10-1) и (10-2) видно, что существует однозначная зависимость  $Z = F(\rho)$ . В большинстве случаев эта зависимость носит монотонный характер.

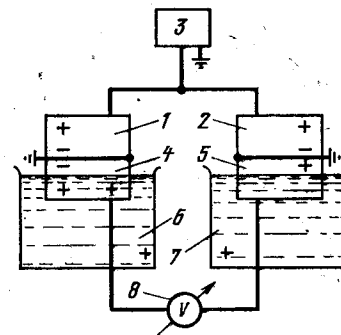


Рис. 10-2. Дифференциальный импедансный УЗ-плотномер.

Рассмотрим основные разновидности схем импедансных плотномеров. Одна из них основана на определении эквивалентного сопротивления излучения пьезоэлемента с известной площадью. О численном значении сопротивления судят по реакции излучающего пьезоэлемента на выходную цепь генератора. В другой разновидности измеряют акустическое давление УЗ-колебаний, вводимых в контролируемую среду, при помощи миниатюрного приемника, устанавливаемого на рабочем торце излучателя, соприкасающемся со средой. Если контакт со средой не допускается, приемник располагают на промежуточном звукопроводе, через который УЗ-колебания излучателя передаются среде и приемнику.

На рис. 10-2 показана схема дифференциального плотномера, в котором измеряется разность акустических давлений, развиваемых идентичными излучателями в контролируемой среде и вспомогательной среде с известным импедансом.

Пьезоэлектрические преобразователи 1 и 2, возбуждаемые электрическими колебаниями генератора 3, излучают УЗ-колебания через аналогичные дополнитель-

ные преобразователи 4 и 5 соответственно в контролируемую 6 и вспомогательную 7 жидкости. Акустические давления колебаний, излученных в жидкости, прямо пропорциональны импедансам. На обкладках преобразователей 4 и 5 возникают электрические напряжения УЗ-частоты, пропорциональные акустическим давлениям и соответственно акустическим импедансам жидкостей 6 и 7. Преобразователи 4 и 5, работающие в качестве приемников, в противофазе подключены к измерительному прибору 8, который регистрирует разность напряжений, пропорциональную разности импедансов жидкостей.

С помощью прибора, представленного на рис. 10-3,а, измеряют акустическое давление УЗ-волны, прошедшей через среду 2. Это давление пропорционально акустическому импедансу среды. Прием волны осуществляется приемником, по конструкции аналогичным излучателю. Электрический сигнал приемника сравнивают в измерительном блоке по амплитуде с сигналом, формируемым

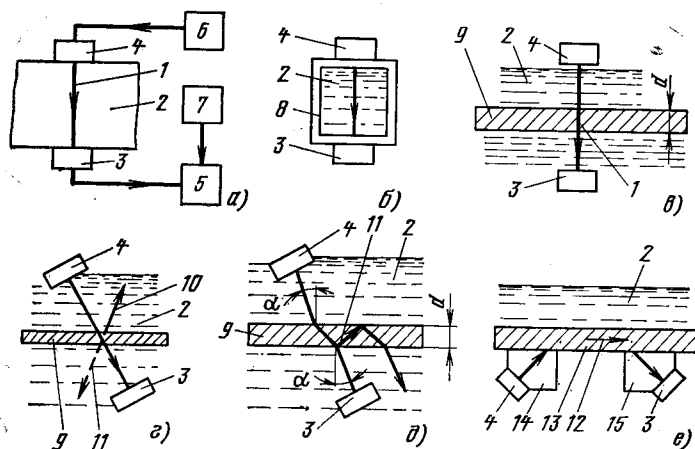


Рис. 10-3. Импедансные УЗ-плотномеры.

а — с контактным измерением; б — с бесконтактным измерением; в — с промежуточным твердым слоем; г, д — с промежуточным тонким твердым слоем, наклонно ориентированным относительно направления волны; е — с импедансной реакцией волновода; 1 — УЗ-волна; 2 — контролируемая среда; 3 и 4 — приемник и излучатель волны; 5 — дифференциальный измерительный блок; 6 — генератор возбуждающих электрических колебаний; 7 — блок формирования опорного сигнала; 8 — резервуар; 9 — промежуточный твердый слой; 10 — отражение излученных УЗ-колебаний от слоя; 11 — двукратное отражение УЗ-колебаний от приемника и слоя; 12 — УЗ-волна Лэмба; 13 — волноводный слой (стенка резервуара); 14 и 15 — преломляющие звукопроводы излучателя и приемника соответственно.

из напряжения генератора в блоке 7 соответственно сигналу приемника при некотором заданном начальном значении акустического импеданса среды. По разности этих сигналов судят об изменениях импеданса. Контроль химически агрессивных или токсичных жидкостей ведется бесконтактным способом с установкой излучателя и приемника (рис. 10-3,б) соосно друг другу на противоположных сторонах резервуара или трубопровода с контролируемой средой.

При измерении малых изменений импеданса жидкостей и газов эффективен плотномер (рис. 10-3,в), который определяют акустическое давление УЗ-волны, прошедшей через среду и размещенный в ней на пути волны промежуточный твердый слой. Толщина  $a$  твердого слоя должна быть по крайней мере на порядок меньше длины волны непрерывных колебаний для материала данного слоя. Во избежание образования стоячих волн, образуемых отражениями 10 и 11 УЗ-колебаний, слой ориентируется (рис. 10-3,г) под углом, отличным от прямого, по отношению к направлению распространения УЗ-колебаний. Для газообразных сред акустическое давление  $P$  при малом отличии угла наклона от прямого [22]

$$P = \frac{kZ_0}{\pi f d \rho_c} \left(1 + 2 \frac{\Delta Z}{Z_0}\right), \quad (10-4)$$

где  $k$  — постоянный коэффициент;  $Z_0$  — начальный импеданс;  $\Delta Z$  — изменение импеданса;  $f$  — частота;  $d$  — толщина слоя;  $\rho_c$  — плотность материала слоя.

Применение твердого слоя толщиной, соизмеримой с длиной волны или превышающей ее, возможно лишь при контроле жидких сред, поскольку колебания, распространяющиеся в газах, такими твердыми слоями практически не пропускаются. При прохождении колебаний через слой по нормали могут использоваться только импульсные колебания длительностью, меньшей удвоенного времени их прохождения поперек слоя. Амплитуда акустического давления вычисляется по формуле

$$P = \frac{k_1 Z_0^2}{(Z' + Z)^2} \left(1 + 2 \frac{\Delta Z}{Z_0}\right), \quad (10-5)$$

где  $Z'$  — акустический импеданс материала твердого слоя.

При наклонном прохождении через твердый слой (рис. 10-3, *д*) наряду с импульсными можно использовать и непрерывные колебания.

Измерение плотности пленочных твердых материалов (рис. 10-3, *в, з*) с известной толщиной  $d$ , которая на порядок меньше длины волны, осуществляется непосредственно определением акустического давления  $P$  по электрическому сигналу приемника. При постоянстве импеданса среды 2, в которой находится контролируемый материал 9, его плотность

$$\rho_c = \frac{k_1}{P}, \quad (10-6)$$

где  $k_1$  — постоянный коэффициент.

Если толщина  $d$  на порядок больше длины волны (рис. 10-3, *в, д*), то данным методом определяется импеданс  $Z'$  материала 9. При нормальном прохождении ( $\alpha=0$ ) колебаний через материал 9 в неизменяющейся среде изменение импеданса  $\Delta Z'$  материала и акустическое давление в первом приближении связаны зависимостью

$$2 \frac{\Delta Z'}{Z'_0} = \frac{k_2}{P} - 1, \quad (10-7)$$

где  $Z'_0$  — начальный импеданс материала.

Показанный на рис. 10-3, *е* плотномер основан на экспоненциальном затухании УЗ-волны Лэмба в твердом слое (волноводе), граничащем с контролируемой средой. Акустическое давление УЗ-волны, поступающей в приемник после преобразования из волны Лэмба,

$$P = k_3 P_0 l^{-1} e^{-(\beta_1 + \beta_2) l}, \quad (10-8)$$

где  $P_0$  — акустическое давление возбужденной волны Лэмба,  $l$  — расстояние, которое проходит волна по стенке;  $\beta_1$  — коэффициент затухания волны в стенке при отсутствии жидкости;  $\beta_2$  — коэффициент затухания, обусловленного реакцией жидкости на стенку.

Из рассмотренных импедансных плотномеров наибольшей чувствительностью обладают приборы с промежуточным слоем и импедансной реакцией волновода.

Импедансно-скоростные плотмеры, в которых сочетаются описанные ранее разновидности импедансных и скоростных способов измерений, перспективны благодаря возможности применения для широкой номенклатуры

различных веществ и бесконтактности измерений. На рис. 10-4, *а* показана схема амплитудно-временного плотмера, являющегося комбинацией время-импульсного прибора с прибором, измеряющим акустическое давление.

Излучатель 1, возбуждаемый электрическим импульсом генератора 2, периодически вводит в контролируемую среду 3 короткий импульс УЗ-колебаний. Далее импульс поступает в приемник 4, преобразующий его в электрический импульс УЗ-частоты, который через

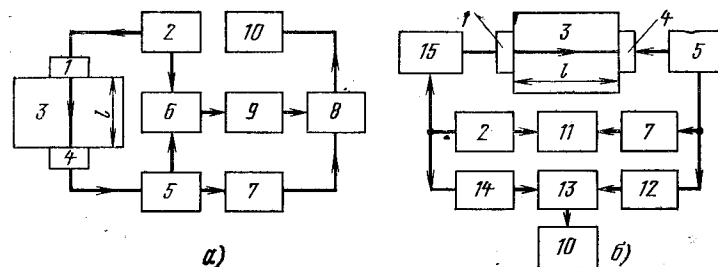


Рис 10-4. Импедансно-скоростные УЗ-плотмеры. *а* — амплитудно-временной; *б* — амплитудно-частотный.

усилитель 5 подается на стопный вход времяизмерительного блока 6 и в пиковый детектор 7. Выходное напряжение постоянного тока детектора, пропорциональное импедансу, поступает на один из входов блока 8 умножения. Одновременно с возбуждением излучателя импульс генератора подается на стартовый вход блока 6. Последний после появления на его стопном входе усиленного сигнала вырабатывает прямоугольный импульс длительностью  $1/c$ . Этот импульс трансформируется посредством преобразователя 9 типа время — напряжение в напряжение постоянного тока, которое подается на второй вход блока 8 умножения. Выходной сигнал блока 8, пропорциональный  $Z \frac{l}{c}$  и соответственно плотности  $\rho$ , регистрируется в выходном индикаторе 10.

В амплитудно-частотном плотномере используется способ измерения акустического давления с частотной коррекцией в сочетании с общим автоциркуляционным электроакустическим трактом. Излучатель 1 (рис. 10-4, *б*), возбуждаемый импульсами (с низкой скважностью)

блокинг-генератора 2, поступающими через усилитель мощности 15, посылает импульс УЗ-колебаний в контролируемую среду 3. Этот импульс далее попадает в приемник 4, преобразующий его в электрический импульсный сигнал УЗ-частоты, который через усилитель 5 и детектор 7 подается в каскад 11 запуска. С помощью этого каскада блокинг-генератор 2 запускается через промежуток времени  $1/c$  после выработки первоначального импульса возбуждения излучателя. В результате создается автоциркуляция импульсов с частотой  $f=c/l$ . Последовательность циркуляционных импульсов из блокинг-генератора 2 поступает также на преобразователь частота — напряжение 14, выходной сигнал которого попадает на один из входов делительного блока 13. На другой вход блока 13 подается из пикового детектора 12 напряжение постоянного тока, преобразованное им из усиленных сигналов приемника 4. Это напряжение пропорционально импедансу  $Z$ . Сформированный в блоке 13 сигнал, пропорциональный плотности, регистрируется индикатором 10.

Представляет интерес плотномер для газов, основанный на комбинированном измерении частот  $f_a$  и  $f_m$  собственных колебаний акустического и механического резонаторов. Расчетная формула имеет вид [15]:

$$\rho = K_1 \frac{f_m^2/K_2 - 1}{f_a^2}, \quad (10-9)$$

где  $K_1, K_2$  — постоянные величины, определяемые характеристиками резонаторов.

Процесс измерения плотности сводится к измерению двух частот при помощи устройства<sup>1</sup>, показанного на рис. 10-5. При подаче питающего напряжения от источника питания 1 на электромагнит 9 мембраны 3 и 8 притягиваются к полюсам электромагнита. В момент притяжения мембраны 3 происходит резкое изменение объема акустического резонатора 2, и в нем возбуждаются затухающие колебания давления газа, происходящие на собственной частоте резонатора  $f_a$ . Эти колебания преобразуются датчиком переменного давления 4 в электрическое напряжение, изменяющееся с той же частотой, и поступают на вход частотомера 5. Таким

<sup>1</sup> Данный прибор, предназначенный для дискретных измерений, помещен во вторую часть книги в виде исключения.

образом происходит измерение частоты  $f_a$ . Затем частотомер 5 подключают к датчику переменного давления 6, который установлен внутри механического резонатора 7. Электромагнит отключается от источника питания 1, мембраны 3 и 8 отходят от полюсов электромагнита. Мембрана 8 начинает затухающие колебания на собственной частоте  $f_m$ , при этом в замкнутом объеме резонатора 7 происходят колебания давления газа с той же частотой  $f_m$ . Эти колебания воспринимаются датчиком 6 и в виде электрического напряжения той же частоты

поступают на вход частотомера 5. После измерения частоты  $f_m$  по формуле (10-9) определяют плотность газа.

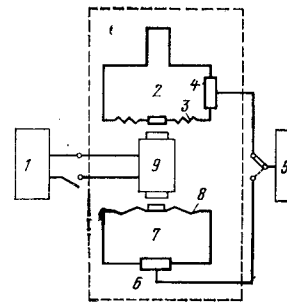


Рис. 10-5. УЗ-плотномер для газов.

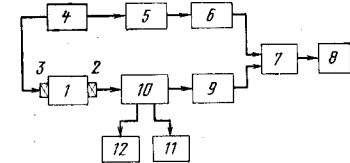


Рис. 10-6. УЗ-плотномер для пульпы.

Значительное развитие получили УЗ-плотномеры, основанные на поглощении звуковой энергии [см. уравнение (10-3)]. На рис. 10-6 приведена типовая структурная схема такого плотномера для пульпы [116]. Радиоимпульсы, вырабатываемые высокочастотным генератором 4, возбуждают излучающий пьезоэлемент 3, который преобразует их в пакеты УЗ-колебаний среды 1, контактирующей с пьезоэлементами 2. Эти акустические сигналы, пройдя среду (пульпу), достигают приемного пьезопреобразователя 2 и в виде радиоимпульсов поступают на вход усилителя 10 измерительного канала, а также на электронный осциллограф 11 и импульсный вольтметр 12. На вход усилителя 5 опорного канала сигналы поступают непосредственно от генератора. После детекторов 6 и 9 сигналы с обоих каналов поступают на электронный мост 7. При прохождении УЗ-волн через чистую воду сигналы измерительного и опорного каналов компенсируются, и на выходе мостовой схемы напряжение отсутствует. При появлении в воде твердых

частиц сигнал измерительного канала ослабляется, в результате чего мост разбалансируется и на выходе его появляется напряжение, пропорциональное концентрации (плотности) пульпы, которое регистрируется самописцем 8.

Следует заметить, что воздушные пузырьки, содержащиеся в пульпе, оказывают значительное влияние на поглощение ультразвука, поэтому перед измерением плотности воздух должен быть удален из пульпы [134].

С другими схемами УЗ-плотномеров (концентраторов) и с их элементами можно познакомиться в работах [29, 90, 103, 117, 129, 232].

В зависимости от схемы и конструкции УЗ-плотномеров их приведенная погрешность колеблется от  $\pm 1,5$  до  $\pm 3\%$ .

## Глава одиннадцатая

### ВИБРАЦИОННЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

К вибрационным плотномерам относят приборы, принцип действия которых основан на зависимости между параметрами упругих колебаний, сообщаемых трубе (сосуду) с исследуемым веществом или помещенному в них телу, с одной стороны, и плотностью вещества — с другой. В последние годы наблюдалось значительное развитие вибрационных плотномеров, усовершенствованные их схем и конструкций [73, 85, 156], что связано с рядом достоинств этих приборов.

Вибрационные плотномеры можно разделить на следующие две группы<sup>1</sup>:

1) амплитудные плотномеры, в которых мерой плотности служит амплитуда колебаний резонатора при постоянной его резонансной частоте. Изменение плотности вызывает отклонение от резонанса и изменение амплитуды. Так как амплитуда колебаний резонатора определяется не только его параметрами, но и рядом других факторов (мощностью импульса, скоростью потока вещества и др.), метрологические характеристики плотномеров этой группы ограничены;

2) частотные плотномеры, в которых измеряют функционально связанную с плотностью вещества частоту собственных колебаний резонатора, образующего вместе с приводом (системой возбуждения) и системой обратной связи электромеханический генератор. Ввиду того что измеряемая частота зависит только от параметров резонатора (формы, размеров, модуля упругости, массы резонатора и жидкости в нем) и не зависит от амплитуды, частотные плотномеры обладают в сравнении с амплитудными более высокими метрологическими характеристиками, а также превосходят их по удобству обработки выходного сигнала, т. е. по конструктивно-эксплуатационным показателям.

Среди основных достоинств, обусловивших растущее распространение частотных плотномеров, необходимо отметить высокую точность, чувствительность и надежность, непосредственное преобразование искомой плотности в частотный выходной сигнал, возможность применения при высоких давлениях для широкой номенклатуры контролируемых сред (газов, жидкостей).

Частота  $f_0$  собственных колебаний механического резонатора определяется из известного соотношения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}}, \quad (11-1)$$

где  $C$  и  $m$  — жесткость и масса резонатора.

Вместе с тем частотные плотномеры обладают и недостатками, к которым относятся ограниченность допускаемого расхода вещества, определяемого площадью сечения проточного канала, нелинейность шкалы, необходимость специальных мер для компенсации влияния температуры и давления на параметры резонатора.

В виброчастотных плотномерах используют два способа измерения: 1) частота резонатора сравнивается с частотой опорного генератора, а компенсация влияния температуры и давления вещества осуществляется при помощи соответствующих датчиков; 2) частота резонатора с контролируемым веществом сравнивается с частотой компенсационного резонатора, заполненного вспомогательной жидкостью с известной плотностью.

Чувствительными элементами вибрационных плотномеров могут быть различного рода резонаторы — электромагнитные или механические (в виде колеблющегося цилиндра, стержня, струны, пластины, камертона и т. д.).

<sup>1</sup> По некоторым вопросам, изложенным в гл. 11, использованы рукописные материалы П. Л. Фельдблюма и Г. С. Бунятова, которым автор выражает свою глубокую признательность.

Резонатор приводится в режим автоколебаний на собственной резонансной частоте, определяемой плотностью вещества, находящегося в нем (проточный<sup>1</sup> плотномер) или окружающего его (погружной плотномер). Как известно, механические резонаторы обладают существенно большей добротностью по сравнению с электромагнитными, поэтому плотномеры с электромагнитными колебательными системами получили преобладающее развитие и распространение. С основами построения электромагнитных колебательных систем с распределенными параметрами можно познакомиться в работах [27, 100].

Сравнивая между собой проточные и погружные резонаторы, следует отметить преимущества и большее распространение первых, что обусловлено принципиальной независимостью показаний от свойств вещества в резонаторе, меньшей восприимчивостью к гидродинамическому воздействию потока, более простой системой возбуждения, возможностью измерения плотности неоднородных веществ.

Если в проточных плотномерах часть проточной системы колеблется вместе с заполняющим ее веществом, причем в нем не возникают упругие волны, то в погружных плотномерах резонатор колеблет вещество и возбуждает в нем волновое движение; возникающее акустическое поле имеет ближнюю зону, где вещество движется вместе с резонатором (полезный эффект), и дальнюю зону, вносящую погрешность в результат измерения из-за отражения упругих волн от стенок проточной системы и их возвращения к резонатору, причем этот эффект зависит от скорости распространения акустических волн в веществе, которая является функцией температуры, плотности и т. д.

Виброамплитудные плотномеры нашли применение в некоторых специальных областях науки и техники. Так, погружной камертонный амплитудный плотномер, схема которого дана на рис. 11-1, был использован для измерения плотности атмосферы Венеры со спускаемых аппаратов космических станций «Венера-5» и «Венера-6» [121]. Диапазон измерений — от 0,5 до 45 кг/м<sup>3</sup>. В интервале температур 0—350°C погрешность измерений не превышает  $\pm 10\%$ .

<sup>1</sup> Термин «проточный» будем применять условно, распространяя его и на случай, когда испытуемое вещество неподвижно в замкнутой полости резонатора.

Погружные амплитудные плотномеры рекомендованы [166] для измерения плотности высокотемпературных расплавов.

В амплитудном плотномере для газов [195] чувствительным элементом служит упругая мембрана, приводимая электростатическими силами в колебательное движение с резонансной частотой и постоянной амплитудой. Изменение плотности окружающей газовой среды вызывает изменение амплитуды колебаний, для ее восстановления соответственно изменяют переменное напряжение

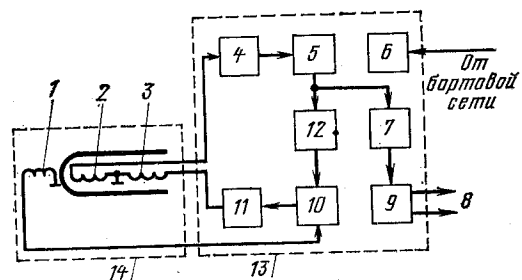


Рис. 11-1. Погружной камертонный виброамплитудный плотномер. 1 — компенсационная катушка; 2 — сигнальная катушка; 3 — катушка возбуждения; 4 — согласующий каскад; 5 — предварительный усилитель; 6 — стабилизатор напряжения; 7 — выходной каскад; 8 — радиотелометрическая система; 9 — выпрямитель; 10 — каскад температурной компенсации; 11 — усилитель мощности; 12 — каскад, работающий в режиме ограничения; 13 — электронный преобразователь; 14 — датчик.

для создания колебательного движения. Чувствительным органом является короткий полый металлический цилиндр, в середине которого установлена круглая мембрана, делящая полость цилиндра на две части; каждая полость сообщается посредством трубки с контролируемым газом. На внутренней стороне каждого диска имеется металлическая обкладка, образующая с мембраной электрическую емкость. Для приведения мембраны в колебательное движение к обкладке одного из дисков и мембране подведено напряжение, представляющее собой сумму постоянной составляющей (напряжение смещения) и переменной составляющей с частотой, соответствующей резонансной частоте мембраны. Емкость, образованная обкладкой второго диска и мембраной, используется для измерения амплитуды колебаний мембраны. Емкость контролируется при помощи усилителя, чувствительного к смещению мембраны.

Выходной сигнал усилителя, смещенный по фазе, пройдя через ограничитель, подается через сопротивление и конденсатор на обкладки емкостей, поддерживая амплитуду колебаний на заданном уровне. Этот же сигнал, пройдя через преобразователь и дифференциальный усилитель, подключенный к источнику постоянного напряжения смещения, приводит в движение серводвигатель,

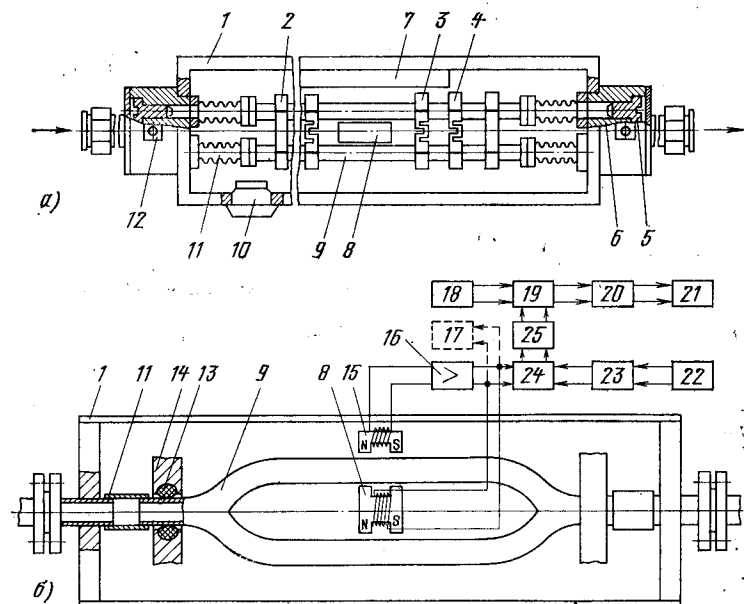


Рис. 11-2. Проточные виброчастотные плотномеры со сдвоенным камертоном.

перемещающий стрелку показывающего прибора. Серводвигатель перемещает также движки реостатов обратной связи, включенных в цепи подачи постоянного и переменного напряжений на обкладки емкостей.

На рис. 11-2,а показан проточный виброчастотный плотномер для жидкостей, снабженный сдвоенным камертоном [2]. Контролируемый поток поступает в датчик и отводится из него через распределителя 6, разветвляющие поток в трубки 9 чувствительного элемента. На распределителях установлены платиновые термометры сопротивления 12, введенные в поток. Между распределителями и трубками распо-

жены сильфоны 11, устраняющие температурные напряжения и влияние вибрации корпуса 1 на вибратор. Торцы распределителей заглушены пробками 5.

Влагопоглотитель 10, размещенный на корпусе, предотвращает конденсацию влаги на трубках при понижении температуры жидкости. Трубки соединены между собой системой упругих перемычек 3, 4 и образуют совместно с ними высокочастотную механическую колебательную систему — резонатор. Измерение основано на зависимости частоты собственных колебаний резонатора от его массы, т. е. от плотности протекающей по трубкам жидкости. Преобразование плотности в частотный сигнал осуществляется по автогенераторной схеме. Электромагниты 8, расположенные между трубками, подключены к входу и выходу полупроводникового усилителя 7, возбуждающего колебания резонатора. Датчик соединен со вторичной аппаратурой и источником питания через блоки, обеспечивающие искробезопасность.

Применение упругих перемычек между центральной частью резонатора и его жесткими основаниями 2 позволяет равномерно распределять напряжения по площади контакта трубки с перемычкой и между перемычками. Настройку частоты собственных колебаний резонатора можно производить грубо — регулировкой положения центральных перемычек и точно — периферийными перемычками. Конструкция проточной системы позволяет проводить осмотр и очистку внутренней полости датчика без его демонтажа и разбора. При вертикальной установке и скорости потока снизу вверх около 0,5 м/с обеспечивается удаление газовых пузырьков и механических примесей.

Благодаря высокой добротности резонатора и малым фазовым и нелинейным искажениям в усилителе частота автоколебаний близка к частоте собственных колебаний резонатора и определяется плотностью жидкости. Автоматической регулировкой усиления поддерживается неизменность амплитуды колебаний во всем диапазоне измерений.

Зависимость периода  $T$  колебаний резонатора от плотности жидкости имеет вид:

$$T = T_0 \sqrt{1 + k\rho}, \quad (11-2)$$

где  $T_0$  — начальный период колебаний ( $\rho=0$ );  $k$  — коэффициент чувствительности.



Величина  $T_0$  зависит от размеров резонатора и положения перемычек, значение  $k$  определяется отношением внутреннего объема к массе единицы длины трубки. Градуировка прибора состоит в измерении периодов колебаний  $T_1$  и  $T_2$  в двух состояниях: предварительно очищенный плотномер заполнен атмосферным воздухом; плотномер заполнен дистиллированной водой.

Параметры плотномера вычисляют подстановкой в выражение (11-2) значений  $T_1$  и  $T_2$ . С учетом плотностей воздуха и дистиллированной воды имеем:

$$T_0 = 0,99968T_1, [c]; k = \left(1002,4 \frac{T_2^2}{T_1^2} - 1001,8\right) \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Во вторичном приборе предусмотрена цепь коррекции, вводящая поправки на тепловое расширение жидкости и изменение показаний плотномера в зависимости от температуры жидкости. Настройка диапазона шкалы производится во вторичном приборе. Основные технические характеристики плотномера: диапазон измерений 690—1050 кг/м<sup>3</sup>, собственная частота колебаний резонатора при заполнении воздухом 1250 Гц, водой — 1050 Гц; температура жидкости 10—100°C; давление — до 16 кгс/см<sup>2</sup> (1,6 МПа); температура окружающего воздуха — от —30 до 50°C; скорость потока жидкости — до 0,6 м/с; основная погрешность  $\pm 1,5$  кг/м<sup>3</sup>; кроме выходного частотного сигнала имеется токовый выход 0—100 мВ (для регистрации показаний самопишущим прибором).

В проточном плотномере, представленном на рис. 11-2,б [52], применен резонатор в виде сдвоенного трубчатого камертона, ветви которого приводятся в режим автоколебаний в противофазе с помощью системы возбуждения, состоящей из возбуждателя 8, приемника колебаний 15 и усилителя 16. Камертон служит звеном положительной обратной связи, и стабильность его собственной резонансной частоты, определяемая добротностью колебательной системы, характеризует точностные возможности прибора в целом. Резонатор отделен от опор 14 резиновыми манжетами 13, а жидкость подводится к нему по эластичным элементам 11, которые предотвращают передачу продольных колебаний ножек камертона корпусу 1 и трубопроводу. Кроме того, они защищают камертон от воздействия температурных деформаций корпуса и трубопровода. Выходной сигнал

датчика в виде частоты переменного тока, зависящий от плотности, регистрируется цифровым частотомером 17, подключаемым к выходу усилителя 16. Частотный сигнал преобразуется в аналоговый рядом дополнительных устройств, входящих в схему преобразователя. Изменение частоты датчика при изменении плотности в рабочем диапазоне обычно не превышает 10% собственной частоты резонатора.

Необходимые чувствительность и точность измерения полезного сигнала достигаются с помощью дифференциальной схемы. Пассивный (сравнительный) канал такой схемы содержит кварцевый генератор 22 опорной частоты с блоком 23, делящим частоту генератора до значения, близкого к частоте резонатора, в начале рабочего диапазона. Сигналы активного и пассивного каналов схемы сравниваются в смесителе 24, и разностная частота выделяется низкочастотным фильтром 25. Прецизионный частотомер 19 преобразует дискретный сигнал в аналоговый, который регистрируется стандартным записывающим устройством 21. Сигнал, соответствующий разности начальной частоты датчика и опорной частоты, компенсируется блоком 18 установки нуля. Поправка к показаниям прибора при изменении температуры измеряемой среды вводится автоматически термокомпенсатором 20. Последний представляет собой неравновесный мост, в одном из плеч которого имеется терморезистор, помещаемый в исследуемую среду. Показания плотномера не зависят от вязкости среды, так как на резонансную частоту датчика влияет только масса жидкости, находящейся в резонаторе.

Собственная частота резонатора определяется зависимостью

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{EI/(m_{ст} + m_{ср})}, \quad (11-3)$$

где  $\lambda$  — постоянная (для основной частоты  $\lambda = 4,73$ );  $l$  — эквивалентная длина ветви резонатора;  $E$  — модуль упругости материала резонатора;  $I$  — момент инерции сечения;  $m_{ст}$ ,  $m_{ср}$  — масса единицы длины соответственно стенок резонатора и среды внутри него.

Из выражения (11-3) получаем:

$$f = f_0 \sqrt{m_{ст}/(m_{ст} + m_{ср})}, \quad (11-4)$$

где  $f_0 = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{EI/m_{ст}}$  — частота пустого резонатора.

Уравнение (11-3) удобно записать в виде

$$f = f_0 (V \sqrt{1 + \Delta\rho})^{-1}, \quad (11-5)$$

где  $A = S/m_{ст}$  — постоянная датчика;  $S$  — площадь поперечного сечения отверстия трубки.

По уравнению (11-5) строят градуировочную характеристику датчика путем экспериментального определения начальной частоты и постоянной  $A$ , например, по резонансным частотам датчика с воздухом и дистиллированной водой. В широком интервале изменения плотности уравнение (11-5) существенно нелинейно и линей-

ризуется с помощью соответствующих устройств — линеаризаторов. Однако в узком диапазоне плотностей нелинейностью в ряде случаев пренебрегают, при этом погрешность от нелинейности в диапазоне  $1000\text{—}1100 \text{ кг/м}^3$  не превышает  $\pm 0,5\%$ .

Описанный плотномер можно применять как для однородных жидкостей, так и для суспензий. Погрешность измерений составляет  $\pm 2,5\%$  верхнего предела шкалы.

На рис. 11-3 показан плотномер с резонатором в виде замкнутого камертона [286]. Верхние концы тонкостенных вертикальных трубок 1 камертона закреплены в массивном корпусе 2, который врезается в технологиче-

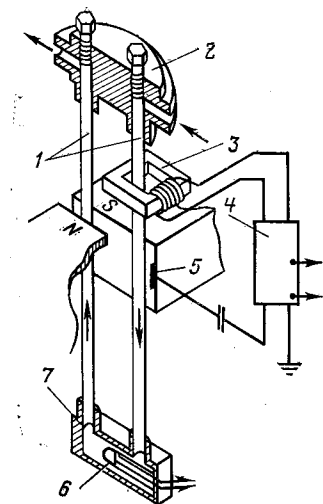


Рис. 11-3. Проточный плотномер с замкнутым камертоном.

ский трубопровод, а нижние — в корпусе 7 малой массы, содержащем также термометр сопротивления 6, включенный в схему температурной компенсации. Трубки приводятся в колебания в противофазе электромагнитной системой возбуждения с трансформатором 3, первичная обмотка которого подключена к выходу усилителя 4, а трубки, находящиеся в сильном магнитном поле ( $4000 \text{ Гс}$ ) между полюсами постоянного магнита, являются вторичной обмоткой трансформатора. Когда

на первичную обмотку подан переменный ток, по трубкам тоже течет ток, и они отклоняются в магнитном поле, начиная вибрировать. Благодаря электростатическому приемнику колебаний 5, связанному с входом усилителя, в системе возникают незатухающие колебания с резонансной частотой.

Частотный сигнал с выхода усилителя смешивается с частотным сигналом стандартного генератора, и частота биений преобразуется в напряжение постоянного тока  $0\text{—}10 \text{ мВ}$ . Температура жидкости — от  $-10$  до  $+100^\circ\text{C}$ ; давление — до  $20 \text{ кгс/см}^2$  ( $2 \text{ МПа}$ ); диапазон

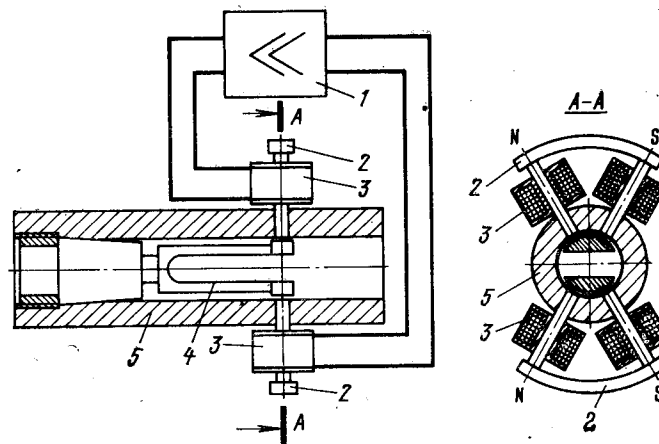


Рис. 11-4. Погружной камертонный виброчастотный плотномер.

1 — транзисторный усилитель переменного тока; 2 — постоянный магнит; 3 — ферромагнитный полюсный наконечник с катушкой; 4 — камертон; 5 — труба.

измерений  $500\text{—}1500 \text{ кг/м}^3$ ; наименьший диапазон шкалы  $50 \text{ кг/м}^3$ ; воспроизводимость показаний  $\pm 1\%$ ; нелинейность  $\pm 0,5\%$ .

Для измерений плотности газов под высоким давлением разработан погружной камертонный плотномер [198], в котором незатухающие колебания камертона на собственной частоте возбуждаются при помощи работающей на самовозбуждении системы, состоящей из двух пар полюсных наконечников постоянных магнитов с катушками и усилителя; усилитель усиливает электрические колебания, поступающие с одной пары катушек и подает их на другую пару (рис. 11-4).

Сигналы от усилителя сравниваются со стандартной частотой от кварцевого генератора, и разность, являющаяся мерой плотности газа, фиксируется частотомером. В относительно узком диапазоне плотностей частота практически линейно зависит от плотности. Погрешность составляет  $\pm 1\%$  (при постоянной температуре) и может быть снижена до  $\pm 0,5\%$  при применении специального цифрового счетно-решающего устройства, состоя-

щего из двух электронных реверсивных счетчиков и блока управления.

Известен ряд других разновидностей схем камертонных частотных плотномеров [189], лучшие из которых обладают добротностью 3000 и обеспечивают измерение с погрешностью  $\pm 0,1$  кг/м<sup>3</sup> при температуре от  $-30$  до  $100^\circ\text{C}$  и давлении до  $70$  кгс/см<sup>2</sup> (7 МПа) [259].

Большинство схем вибрационных плотномеров не позволяет измерять плотность гидросмесей, так как вы-

сокая собственная частота применяемых колебательных систем вызывает фазовый сдвиг между движениями жидкости и твердых частиц. Для измерения плотности гидросмесей разработан [170] проточный плотномер с крутильным маятником (рис. 11-5,а), состоящий из подвижного участка трубопровода 1, датчика положения 3, усилителя 4 и привода 6, соединенных последовательно. Подвижный участок сочленен с трубопроводом сильфонами 5 и подвешен на оси 7, проходящей через его центр тяжести. Ось закреплена на основании прибора с помощью упругих элементов (пружин) 2. Возбуждение и поддержание автоколебаний достигается посредством датчика положения и привода, охваченных через усилитель положительной обратной связью.

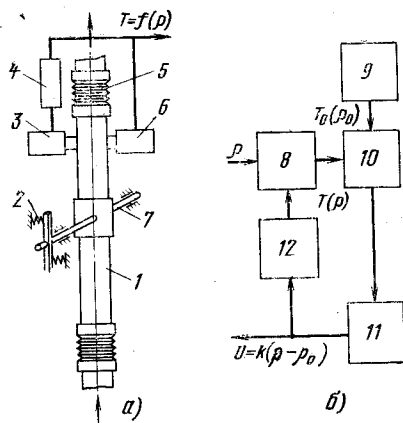


Рис. 11-5. Маятниковый плотномер для гидросмесей.  
а — принципиальная схема; б — структурная схема.

сокая собственная частота применяемых колебательных систем вызывает фазовый сдвиг между движениями жидкости и твердых частиц. Для измерения плотности гидросмесей разработан [170] проточный плотномер с крутильным маятником (рис. 11-5,а), состоящий из подвижного участка трубопровода 1, датчика положения 3, усилителя 4 и привода 6, соединенных последовательно. Подвижный участок сочленен с трубопроводом сильфонами 5 и подвешен на оси 7, проходящей через его центр тяжести. Ось закреплена на основании прибора с помощью упругих элементов (пружин) 2. Возбуждение и поддержание автоколебаний достигается посредством датчика положения и привода, охваченных через усилитель положительной обратной связью.

$$T = 2\pi \sqrt{I_T/C}, \quad (11-6)$$

где  $C$  — угловая жесткость, Н·м/рад;  $I_T$  — момент инерции колеблющегося тела относительно оси колебаний, кг·м<sup>2</sup>.

С изменением плотности гидросмеси изменяется момент инерции подвижного участка относительно оси колебаний, а следовательно, и период колебаний. Для линейаризации выходного сигнала датчика используется цепь обратной связи (рис. 11-5,б).

Период колебаний эталонного генератора 9 соответствует периоду  $T_0$  колебаний датчика 8 при протекании смеси с минимально возможной плотностью  $\rho_0$ . На дискриминатор 10 длительности периода поступают два сигнала — от эталонного генератора и датчика 8. Выходной сигнал дискриминатора, соответствующий разности периодов, попадает на дискретно-аналоговый преобразователь 11, откуда в виде силы тока или напряжения подается на узел 12 изменения жесткости (например, пропорциональный электромеханический преобразователь), замыкающий цепь отрицательной обратной связи. Сигнал, поступающий в узел 12 и являющийся выходной величиной всего устройства, оказывается линейно зависимым от плотности гидросмеси. Совокупность рассмотренных элементов образует пропорциональную следящую систему, обеспечивающую с точностью до статизма стабилизацию периода колебаний датчика на уровне  $T_0$ .

Для поддержания автоколебательного процесса в колебательной системе датчика периодически подводится энергия от привода, возбуждающего силу, которая изменяется по гармоническому закону. Датчик монтируется на жестком основании. Как показали испытания макета, погрешность измерений плотности в диапазоне  $1000$ — $1400$  кг/м<sup>3</sup> составляет  $\pm 0,7\%$  верхнего предела шкалы.

У другого проточного плотномера с крутильным маятником [227] чувствительный элемент выполнен как U-образная труба из магнитного материала с концами,

жестко закрепленными в неподвижном цоколе. Вблизи трубы расположены два электромагнита, создающих крутящий момент, который стремится вызвать закручивание трубы относительно ее продольной оси. При подаче в обмотки электромагнитов переменного тока возникают крутильные колебания трубы. В цоколь встроены пьезоэлектрический или магнитострикционный датчик колебаний. Его выходной сигнал поступает на вход усилителя. Усиленный сигнал частоты переменного тока подается в обмотки электромагнитов и на частотомер. При протекании жидкости труба колеблется с резонансной частотой, зависящей от плотности жидкости. Для компенсации влияния температуры предусмотрена вторая, идентичная колебательная система с той же резонансной частотой, свободная от жидкости. Измеряемая разность  $\Delta f$  частот колебаний двух систем не зависит от температуры жидкости:

$$\Delta f = f \cdot \frac{C_p}{2T_r}, \quad (11-7)$$

где  $f_0$  — резонансная частота «пустой» трубы.

Погружной плотномер с крутильным маятником в виде диска используют, в частности, для измерения плотности чистых веществ вблизи критической точки жидкость — пар [19].

Для исследований плотности жидкостей и газов в зависимости от давления и температуры предложен проточный плотномер с крутильным маятником, по форме выполненным в виде тонкостенного тороида, полость которого заполняют исследуемым веществом [33]. Измерение плотности сводится к измерению периода собственных колебаний маятника.

Проточный дифференциальный плотномер с двумя U-образными трубками (рис. 11-6) [157] обеспечивает уменьшение нелинейности характеристики, а также автоматическую компенсацию влияния температуры и давления без применения соответствующих дополнительных датчиков. Он состоит из двух резонаторов 1 и 2 с индивидуальными системами возбуждения, включающими в себя катушки возбуждения 3, 10, катушки обратной связи 4, 9 и усилители 7, 8, блока сравнения частот 6 и вторичного прибора 5. Один из резонаторов снабжен дополнительным грузом 11. Исследуемая среда непрерывно и одновременно поступает в оба резонатора,

обеспечивая в них равенство температур и давлений. Резонаторы выполнены из одинаковых трубок в виде U-образных консолей, но с разными (за счет длины) изгибными жесткостями. Резонатор 2 с меньшей жесткостью имеет большую чувствительность, а резонатор 1 с большей жесткостью за счет дополнительного груза 11 имеет меньшую чувствительность.

Резонаторы с системами возбуждения образуют два электромеханических генератора, частоты с которых подаются в блок сравнения, откуда разностный частотный сигнал, функционально связанный с плотностью исследуемой среды и скомпенсированный по температуре и давлению, подается на вторичный прибор аналогового или дискретного типа.

Для дополнительного повышения точности измерения целесообразно [158] в контур возбуждения ввести датчик колебаний и электромагнит, установленные попарно у каждой ветви резонатора.

Дугообразная часть резонатора имеет сплюснутое поперечное сечение, что способствует компенсации изменения давления: при повышении давления дугообразная часть распрямляется, раздвигая ветви, что приводит к понижению частоты колебаний. Прибор рассчитан на давление до 400 кгс/см<sup>2</sup> (40 МПа); погрешность  $\pm 1\%$ .

Резонатором может быть тонкий диск из магнитного материала, закрепленный в трех точках, лежащих на узловой окружности диска. Колебания возбуждаются сердечником соленоида, установленного под центром диска. Резонансная частота определяется при плавном изменении частоты генератора, питающего соленоид, по максимуму сигнала индуктивного датчика, расположен-

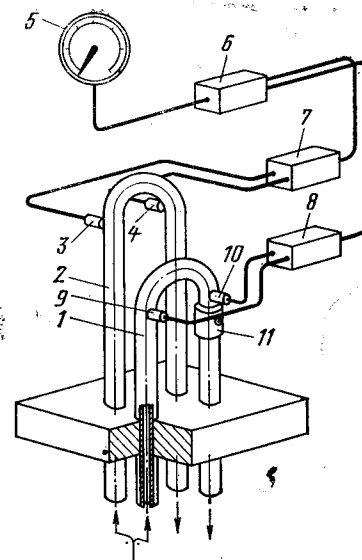


Рис. 11-6. Проточный плотномер с двумя резонаторами.

ного у края диска. Конструкция плотномера обеспечивает работу его при высоких температурах, в частности в ядерных реакторах.

Возможно выполнение чувствительного элемента в виде лопатки, зафиксированной на конце упругого стержня, перпендикулярно которому крест-накрест прикреплены четыре стержня, используемых для возбуждения и приема колебаний в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи индуктивных катушек [176].

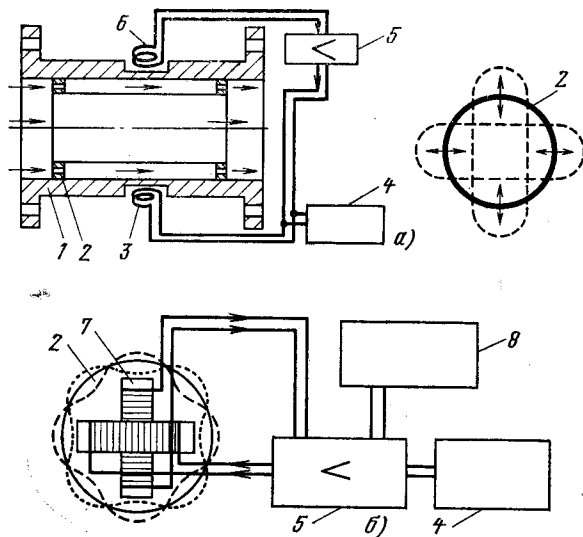


Рис. 11-7. Погружные плотномеры с цилиндрическим резонатором. а — с наружным возбуждением; б — с внутренним возбуждением; 1 — корпус; 2 — цилиндр с перфорированными фланцами; 3 — возбуждающая катушка; 4 — частотомер (или измеритель периода колебаний); 5 — усилитель; 6 — приемная катушка; 7 — система возбуждения; 8 — источник постоянного тока.

К проточным можно отнести частотный плотномер для измерения плотности проб жидкостей, резонатор которого представляет собой U-образную трубку, жестко закрепленную обоими концами. Трубке сообщаются изгибные колебания на собственной частоте. Погрешность измерения  $\pm 1 \text{ кг/м}^3$  [276].

Получили распространение погружные плотномеры с цилиндрическим резонатором [33, 194, 260, 273]. Тонкостенный (толщина стенки 0,15 мм для жидкостей и

0,07—0,15 мм для газов) цилиндр из упругого ферромагнитного сплава передним (по потоку) концом закреплен в трубчатом корпусе из немагнитного материала соосно потоку (рис. 11-7,б) [242]. Поток вещества движется вдоль цилиндра внутри и снаружи, благодаря чему его стенки разгружены от давления. Внутри цилиндра установлены крест-накрест возбуждающая и приемная катушки, оси которых взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра. Цилиндр совершает радиальные колебания (форма показана на рис. 11-7,б) на резонансной частоте, которые возбуждаются и поддерживаются цепью положительной обратной связи, состоящей из приемной катушки, соединенной со входом усилителя и частотомером, и возбуждающей катушки, соединенной с выходом усилителя. Цилиндр укреплен в корпусе по линии узлов колебаний, так что крепление не влияет на частоту. Зависимость частоты  $f$  от плотности имеет вид:

$$f = f_0 (\sqrt{1 + kp})^{-1}, \quad (11-8)$$

где  $f_0$  — частота при начальной плотности;  $k$  — константа, зависящая от размеров цилиндра.

Имеются разновидности этого плотномера, в которых катушки расположены снаружи корпуса на уровне середины образующей цилиндра, причем цилиндр имеет один или два фланца (рис. 11-7,а).

Определенными преимуществами обладает дифференциальный плотномер с двумя цилиндрами, один из которых является измерительным, а второй — сравнительным (он помещен в замкнутом объеме) [201]. Частоту собственных колебаний второго цилиндра регулируют так, чтобы у обоих цилиндров в вакууме была одинаковая частота. При протекании измеряемого вещества разностная частота на выходе смесителя (рис. 11-8) пропорциональна искомой плотности. Подобная система обеспечивает линейную характеристику при давлении газа до  $10 \text{ кгс/см}^2$  (1 МПа).

Различные системы плотномеров с цилиндрическим резонатором имеют следующие характеристики (указаны предельные показатели): диапазон измерений — от 400 до  $3000 \text{ кг/м}^3$  для жидкостей и  $0—120 \text{ кг/м}^3$  для газов; давление — до  $140 \text{ кгс/см}^2$  (14 МПа); температура измеряемой среды — от  $-20$  до  $60^\circ\text{C}$ ; погрешность  $\pm 0,1\%$  верхнего предела шкалы; при  $\rho=0$  период коле-

баний составляет 200 мкс, а далее увеличивается на 1 мкс на каждый 1 кг/м<sup>3</sup>. Имеются, кроме того, такие плотномеры для сжиженных газов с температурой от -269°C при давлении до 700 кгс/см<sup>2</sup> (70 МПа) [255], а также для температур до 400°C [260].

Недостатком цилиндрических резонаторов является зависимость показаний от вязкости вещества и наличия газовых включений в жидкостях.

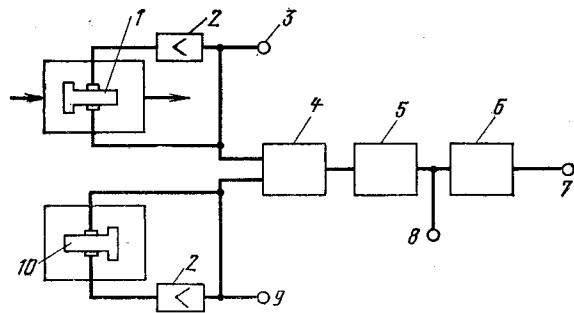


Рис. 11-8. Дифференциальный погружной плотномер с цилиндрическими резонаторами.

1 — измерительный цилиндр; 2 — усилитель; 3 — частотный выходной сигнал; 4 — смеситель; 5 — фильтр-формирователь сигналов; 6 — преобразователь частота — ток; 7 — аналоговый выходной сигнал; 8 — сигнал разностной частоты; 9 — эталонная частота; 10 — сравнительный цилиндр.

К рассматриваемой группе приборов примыкают плотномеры с трубчатым резонатором. На рис. 11-9 показан проточно-погружной плотномер, в котором трубчатый резонатор из упругого материала установлен на двух неподвижных опорах [285]. Две электромагнитные катушки 2 возбуждают в трубе 1 незатухающие колебания синусоидальной формы. Катушки помещены в точке, где колебания достигают максимальной амплитуды. Одна катушка работает в режиме возбуждителя, другая — индукционного приемника. Выходной сигнал подается на усилитель мощности и возвращается на возбуждатель. Упругая труба выполняет функции положительной обратной связи. Плотномер врезается в технологический трубопровод по схеме, позволяющей пропускать жидкость либо через трубу, либо через полость корпуса с внешней стороны трубы, либо по обеим ветвям одно-

временно. Искомую плотность определяют из соотношения

$$\rho = \rho_r \frac{T^2 - T_1^2}{T^2}, \quad (11-9)$$

где  $\rho_r$  — плотность материала трубы;  $T$  — период колебаний пустой трубы в пустом корпусе;  $T_1$ ,  $T_2$  — период колебаний трубы с жидкостью соответственно в пустом корпусе и в корпусе, заполненном той же жидкостью.

Для непрерывного измерения плотности сжиженных газов и их смесей разработан [280] плотномер, основанный на измерении собственной частоты СВЧ-колебаний резонатора в виде отрезка трубчатого волновода с тонкостенными цилиндрическими рефлекторами, расположенными коаксиально у концов волновода. Резонансная частота пустого резонатора составляет 10,2 ГГц. Погрешность измерения плотности  $\pm 0,25\%$ .

Представляет интерес дифференциальный проточный плотномер с СВЧ-колебаниями [175]. Колебания на частоте 1,8 ГГц направляются с генератора в цилиндрический резонатор через циркулятор вокруг отрезка трубопровода с жидкостью. Этот отрезок изготовлен из плавленого кварца, стекловолокна или пластмассы. Жидкость в нем образует концентрический диэлектрический стержень резонатора. Размер цилиндрической полости резонатора выбирается так, чтобы она обладала только одной резонансной модой колебаний. Возбуждение колебаний в резонаторе производится при помощи антенны специальной формы. Если собственная частота коле-

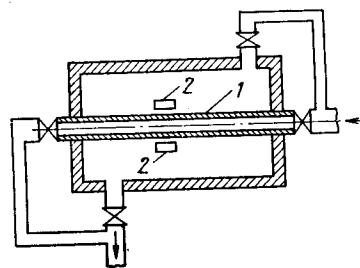


Рис. 11-9.

Рис. 11-9. Проточно-погружной плотномер с трубчатым резонатором.

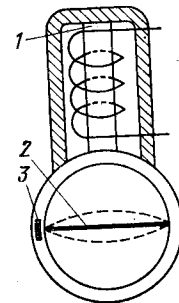


Рис. 11-10.

Рис. 11-10. Измерительная головка плотномера с пластинчатым резонатором.

1 — возбуждающая катушка; 2 — пластина; 3 — пьезоэлемент.

баний совпадает с частотой поступающих колебаний, то практически вся энергия поглощается в резонаторе, а при несовпадении значительная доля энергии отражается назад, в циркулятор, и оттуда поступает в направленный ответвитель, где разделяется на две части. Одна из них через высокочастотный детектор и цепь обратной связи идет в генератор в виде постоянного напряжения, смещающего частоту колебаний генератора до совпадения с собственной частотой колебаний резонатора. Другая часть подается на смеситель, куда через аттенюатор приходят также колебания опорного СВЧ-генератора, стабилизированная частота которого близка к диапазону возможных частот колебаний резонатора, но находится вне его. Разностная частота с выхода смесителя усиливается и используется в качестве меры плотности.

Определенное развитие получили плотномеры с пластинчатым резонатором. На рис. 11-10 показана измерительная головка плотномера, вводимая радиально в трубопровод с контролируемой средой. Тонкая прямоугольная пластина, закрепленная в узловых точках так, что ее плоскости параллельны оси трубопровода [254], совершает незатухающие колебания на резонансной частоте, возбуждаемой соленоидной катушкой с помощью схемы положительной обратной связи с электронным усилителем. Частота или период колебаний служат мерой плотности. В измерительной схеме осуществляется линеаризация выходного сигнала. Градуировка производится путем определения трех коэффициентов уравнения второго порядка на образцовых жидкостях (например, воде, керосине и газолине) или газах. Прибор позволяет измерять широкую номенклатуру веществ (жидкостей, пульп, газов и паров) в диапазоне температур от  $-254$  до  $120^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm (0,1-0,25)\%$ .

Консольное крепление пластины расширяет диапазон измерений и позволяет вести градуировку на одной жидкости [250].

Улучшение условий измерения обеспечивает дифференциальная схема с двумя пластинами, расположенными в двух камерах, в одну из которых подается контролируемый газ, а в другую — воздух [265, 266]. При этом используются два магнитострикционных вибратора, два пьезопреобразователя и одна общая задающая катушка. Достоинства данной схемы обусловлены тем, что

пьезопреобразователи воспринимают удвоенную частоту колебаний и разность резонансных частот вибраторов линейно зависит от отношения плотностей газа и воздуха.

Для измерений при высоких температурах предложено вместо пьезоэлемента применять проволочный тензодатчик, наклеиваемый в середине пластины [184]. Тензодатчик одновременно служит датчиком температуры для коррекции показаний.

## Глава двенадцатая

### РАДИОИЗОТОПНЫЕ И ВИХРЕВЫЕ ПЛТНОМЕРЫ

Радиоизотопные плотномеры относятся к бесконтактным приборам (чувствительный элемент не вводится в движущуюся измеряемую среду) и их целесообразно применять для измерения плотности агрессивных или весьма вязких жидкостей, пульп и жидкостей, находящихся под высоким давлением или имеющих высокую температуру в трубопроводах большого диаметра, однако лишь в тех случаях, когда другие рассмотренные выше плотномеры практически неприменимы. Важным достоинством радиоизотопных приборов является возможность контроля плотности вещества в труднодоступных местах.

Существенным недостатком этих приборов является зависимость показаний от физических свойств испытуемого вещества, что требует индивидуальной градуировки прибора для определенного вида вещества.

В радиоизотопных плотномерах используют три вида ядерного излучения: альфа, бета и гамма. Альфа-излучение обладает малой длиной пробега частиц и поэтому используется только в плотномерах для газов. Бета- и гамма-излучение применяют в плотномерах для жидкостей и твердых веществ. Бета-излучение представляет собой поток электронов или позитронов, испускаемых ядрами атомов и движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Гамма-излучение — это электромагнитные колебания с очень малой длиной волны до  $0,4 \text{ \AA}$  ( $4 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ ). Гамма-лучи характеризуются значительно большей проникающей способностью в сравнении с бета-частицами.

Прохождение гамма-лучей через вещество сопровождается ослаблением их интенсивности (энергия излучения переходит в другие формы энергии). Ослабление интенсивности излучения определяется, с одной стороны, энергией падающего пучка и его спектральным составом, а с другой, — плотностью и химическим составом измеряемой среды. Поглощение гамма-излучения веществом с достаточной степенью точности описывается экспоненциальным уравнением [38]

$$I = I_0 e^{-\eta d \rho}, \quad (12-1)$$

где  $I_0$  — начальная интенсивность пучка гамма-лучей;  $I$  — интенсивность гамма-излучения, прошедшего через слой вещества толщиной  $d$  и плотностью  $\rho$ ;  $\eta$  — массовый коэффициент поглощения гамма-излучения.

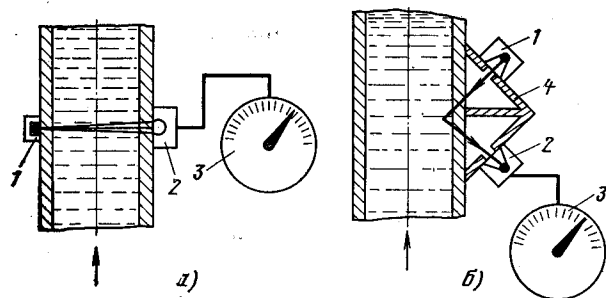


Рис. 12-1. Принцип измерения гамма-плотномером.  
а — с поглощением излучения; б — с рассеянием излучения; 1 — источник гамма-лучей; 2 — приемник излучения; 3 — вторичный прибор; 4 — экран.

Измерение плотности жидкости в трубопроводах и резервуарах при помощи гамма-излучения возможно двумя способами. Первый способ связан с поглощением излучения жидкостью и основан на определении ослабления интенсивности прямого пучка гамма-лучей после прохождения через жидкость. Источник и приемник излучения располагают по обе стороны трубопровода (резервуара) на линии его диаметра, так что прямой пучок гамма-лучей, пройдя через стенки трубопровода (сосуда) и исследуемую жидкость, попадает в приемник излучения (рис. 12-1,а). Второй способ измерения основан на определении ослабления интенсивности пучка гамма-лучей, рассеянного жидкостью (рис. 12-1,б). Источник и приемник излучения размещают по одну сто-

рону трубопровода и экранируют так, что в приемник поступают лишь те гамма-лучи, которые претерпели рассеяние в жидкости; прямой пучок лучей улавливается свинцовым поглотителем. Более широкое распространение для жидкостей получили плотномеры, основанные на зависимости ослабления излучения от плотности вещества, а для твердых тел (грунтов и т. п.) — плотномеры с рассеиванием излучения.

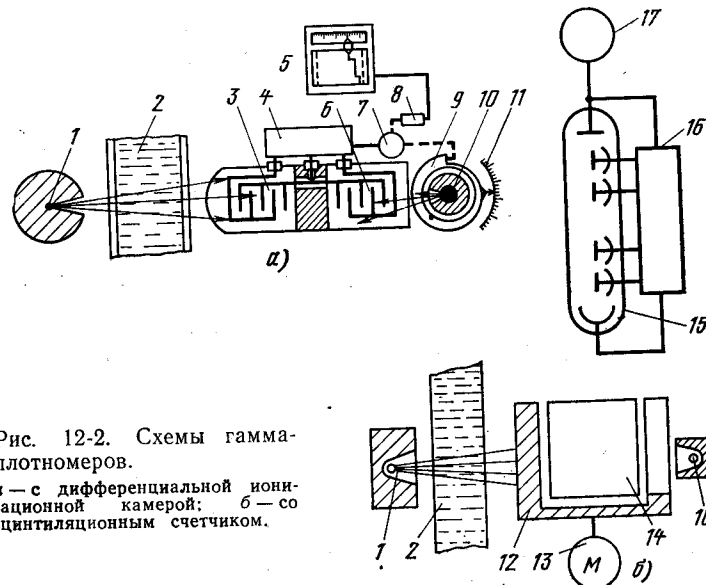


Рис. 12-2. Схемы гамма-плотномеров.  
а — с дифференциальной ионизационной камерой; б — со сцинтиляционным счетчиком.

Чем больше толщина просвечиваемого слоя жидкости, тем выше чувствительность прибора и больше требуемая активность источника излучения. В качестве источника излучения используют радиоактивные изотопы цезий-137, стронций-90, кобальт-60 и др. [114]. Для приема излучения в современных плотномерах наиболее широко применяют ионизационные камеры, газоразрядные и сцинтиляционные счетчики.

На рис. 12-2,а приведена схема автокомпенсационного радиоизотопного плотномера с дифференциальной ионизационной камерой. Лучи от основного источника 1 излучения (цезия-137) проходят через контролируемую жидкость 2 и поступают в основное отделение 3 ионизационной камеры, а лучи от вспомогательного источника 10, пройдя через компенсационный металлический



клин 9, попадают во второе отделение 6 камеры. Разностный сигнал, вызванный изменением плотности жидкости, после усиления в электронном усилителе 4 поступает в реверсивный двигатель 7, который поворачивает клин до момента получения нулевого разностного сигнала и одновременно перемещает сердечник индукционной катушки 8, являющийся датчиком вторичного прибора 5. Шкала 11 прибора линейная.

Диапазон шкалы составляет от 50 до 1000 кг/м<sup>3</sup>; диапазон измерений 300—3500 кг/м<sup>3</sup>; погрешность  $\pm 2\%$  диапазона шкалы.

На рис. 12-2,б представлена схема плотномера со сцинтилляционным счетчиком [118]. С целью повышения точности и в этом приборе применен метод контрольного сигнала, для чего использованы два источника излучения: основной 1 (цезий-137), излучение которого проходит через трубопровод 2, заполненный контролируемой жидкостью, и контрольный 10 (цезий-137), излучение которого не проходит через жидкость. Излучения обоих источников воспринимаются сцинтилляционным счетчиком 14 с фотоэлектронным умножителем 15 раздельно по времени. Прерывание потоков осуществляется с помощью свинцового полуцилиндра 12, вращаемого вокруг приемника излучения синхронным электродвигателем 13. Полуцилиндр 12 попеременно перекрывает поток излучения таким образом, что в течение первого полупериода вращения воспринимается излучение основного источника, пропорциональное плотности жидкости, а в течение второго полупериода — неизменное излучение контрольного источника.

В электронный блок 16 поступают сигналы также попеременно от основного и контрольного источников. Разность этих сигналов после усиления подается на вход автоматического электронного моста 17. Положение стрелки моста зависит от отношения сигналов, а следовательно, и от плотности жидкости.

Диапазон шкалы у этого плотномера изменяется от 50 до 500 кг/м<sup>3</sup> при общем диапазоне измерений 500—3000 кг/м<sup>3</sup>; погрешность  $\pm 2\%$  диапазона шкалы.

Имеется усовершенствованная модель рассмотренного плотномера, в которой излучение второго, контрольного источника проходит через клин-поглотитель и подается на общий сцинтиллятор [120]. Клин-поглотитель позволяет плавно регулировать диапазон шкалы в пре-

делах от 25 до 500 кг/м<sup>3</sup>. Общий диапазон измерений 500—3500 кг/м<sup>3</sup>. Погрешность составляет  $\pm 1$  кг/м<sup>3</sup>. Прибор имеет унифицированный выходной сигнал по току 0—5 мА и по напряжению 0—10 В. Плотномер рассчитан на работу с широкой номенклатурой жидкостей, в том числе трехкомпонентных сред.

Радиоизотопный плотномер со сцинтилляционным счетчиком, основанный на ослаблении гамма-излучения, позволяет измерять также плотность криогенных жидкостей, в том числе шугообразных [127].

Необходимо отметить существенное развитие радиоизотопных плотномеров, специально предназначенных для контроля плотности различных пульп и гидросмесей [30, 38].

Широко используются гамма-плотмеры и другие радиоизотопные плотмеры для определения плотности твердых веществ, в частности, в гидротехнике [119], в геологии, горном деле, строительстве, геофизике, почвенно-мелиоративных исследованиях и др. [10, 25, 28, 47, 53]. Особо следует выделить применение гамма-плотмера для измерения плотности грунта Луны, производившееся с космической станции «Луна-13» [165].

С основами расчетов при проектировании радиоизотопных плотномеров можно ознакомиться в [38, 75].

Методика градуировки и поверки радиоизотопных плотномеров описана в [57], а также в методических указаниях № 232 и 326 Госстандарта СССР.

В последние годы начались разработки *вихревых* плотномеров, в которых используется зависимость частоты вихревых колебаний, возникающих в потоке жидкости или газа, от плотности [74а]. У вихревого плотмера для жидкостей [256] корпус в форме параллелепипеда внутри разделен (вертикальными герметичными стенками и симметрично установленными полуцилиндрами с горизонтальной продольной осью) на три камеры: две внешние и внутреннюю. Стенки полуцилиндров пористые. Две жидкости с различными плотностями поступают во внешние камеры, проходят через стенки полуцилиндров во внутреннюю камеру, смешиваются в ней и выходят из корпуса. При этом ввиду различия плотностей под действием силы тяжести образуется вихрь, угол наклона которого, зависящий от геометрических размеров датчика, расхода и плотностей жидкостей, измеряется чувствительным элементом крыловид-

ной формы. При известной плотности одной жидкости выходной сигнал чувствительного элемента является мерой плотности второй жидкости.

Вихри можно создать также путем закручивания потока при помощи каких-либо направляющих, установленных на стенках трубопровода или на его оси [197, 261]. При взаимодействии такого потока с расположенным ниже по течению устройством, деформирующим поле скоростей, возникает прецессия средней струйки вокруг оси с частотой, зависящей от плотности жидкости. Возникающие пульсации регистрируют при помощи расположенного на стенке трубы пьезодатчика или термоанемометра.

В заключение раздела необходимо констатировать, что методы и аппаратура для поверки (в динамике) плотномеров, применяемых при непрерывных измерениях плотности, разрабатываются крайне медленно. Из официальных нормативных документов по этому вопросу (кроме упомянутых выше указаний по поверке радиозотопных плотномеров) существует только один — методические указания № 335 Госстандарта СССР по поверке поплавковых плотномеров.

Некоторые рекомендации по поверке плотномеров можно найти в [96, 248].

Плотность дистиллированной воды при атмосферном давлении  
760 мм рт. ст. (101 325 Па), кг/м<sup>3</sup>

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	999,839	846	852	859	865	871	877	882	888	893
1	898	903	908	913	917	921	925	929	933	936
2	940	943	946	949	952	954	956	959	961	962
3	964	966	967	968	969	970	971	971	972	972
4	972	972	972	971	971	970	969	968	967	965
5	964	962	960	958	956	954	951	949	946	943
6	940	937	934	930	926	923	919	915	910	906
7	901	897	892	887	882	877	871	866	860	854
8	848	842	836	829	823	816	809	802	795	788
9	781	773	765	758	750	742	734	725	717	708
10	699	691	682	672	663	654	644	635	625	615
11	605	595	584	574	563	553	542	531	520	508
12	497	486	474	462	451	438	426	414	402	389
13	377	364	351	338	325	312	299	285	271	258
14	244	230	216	202	188	173	159	144	129	114
15	099	084	069	054	038	022	007	991*	975*	958*
16	998,943	926	910	894	877	860	843	826	809	792
17	775	757	740	722	704	686	668	650	632	614
18	595	577	558	539	520	502	482	463	444	425
19	405	385	366	346	326	306	286	265	245	224
20	204	183	162	141	120	099	078	057	035	014
21	997,992	971	949	927	905	883	860	838	816	793
22	770	747	725	702	679	656	632	609	585	562
23	538	515	491	467	443	419	394	370	345	321
24	296	272	247	222	197	172	146	121	096	070
25	045	019	993*	967*	941*	915*	889*	863*	836*	810*
26	996,783	757	730	703	676	649	622	595	568	540
27	513	485	458	430	402	374	346	318	290	262
28	233	205	176	148	119	090	061	032	003	974*
29	995,945	915	886	856	827	797	767	737	707	677
30	647	617	586	556	526	495	464	433	403	372
31	341	310	278	247	216	184	153	121	090	058
32	026	997*	962*	930*	898*	865*	833	801	768	735
33	994,703	670	637	604	571	538	505	472	438	405
34	371	338	304	270	236	202	168	134	100	066
35	032	997*	963*	928*	893*	859*	824*	789*	754*	719*
36	993,684	648	613	578	543	507	471	436	400	364
37	328	292	256	220	184	148	111	075	038	002
38	992,965	928	891	855	818	780	743	706	669	631
39	594	557	519	481	444	406	368	330	292	254
40	215	—	—	—	—	—	—	—	—	—

\* Значения плотностей, первые три цифры которых берутся в следующей строке.

Примечание. Таблица составлена по материалам таблиц стандартных справочных данных ГСССД 2-77 „Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100°C“ (М.: Изд-во стандартов, 1978) с учетом работы [5].

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Плотность сухого атмосферного воздуха  $D_{t, B}$ , кг/м<sup>3</sup>

t, °C	Барометрическое давление B мм рт. ст.						
	720	730	740	750	760	770	780
0	1,225	1,242	1,259	1,276	1,293	1,310	1,327
1	1,221	1,238	1,255	1,272	1,288	1,305	1,322
2	1,216	1,233	1,250	1,267	1,284	1,301	1,318
3	1,212	1,229	1,245	1,262	1,279	1,296	1,313
4	1,207	1,224	1,241	1,258	1,274	1,291	1,308
5	1,203	1,220	1,236	1,253	1,270	1,287	1,303
6	1,199	1,215	1,232	1,249	1,265	1,282	1,299
7	1,194	1,211	1,228	1,244	1,261	1,277	1,294
8	1,190	1,207	1,223	1,240	1,256	1,273	1,289
9	1,186	1,202	1,219	1,235	1,252	1,268	1,285
10	1,182	1,198	1,215	1,231	1,247	1,264	1,280
11	1,178	1,194	1,210	1,227	1,243	1,259	1,276
12	1,173	1,190	1,206	1,222	1,239	1,255	1,271
13	1,169	1,186	1,202	1,218	1,234	1,251	1,267
14	1,165	1,181	1,198	1,214	1,230	1,246	1,262
15	1,161	1,177	1,193	1,210	1,226	1,242	1,258
16	1,157	1,173	1,189	1,205	1,221	1,238	1,254
17	1,153	1,169	1,185	1,201	1,217	1,233	1,249
18	1,149	1,165	1,181	1,197	1,213	1,229	1,245
19	1,145	1,161	1,177	1,193	1,209	1,225	1,241
20	1,141	1,157	1,173	1,189	1,205	1,221	1,236
21	1,137	1,153	1,169	1,185	1,201	1,216	1,232
22	1,134	1,149	1,165	1,181	1,197	1,212	1,228
23	1,130	1,145	1,161	1,177	1,193	1,208	1,224
24	1,126	1,142	1,157	1,173	1,189	1,204	1,220
25	1,122	1,138	1,153	1,169	1,185	1,200	1,216
26	1,118	1,134	1,149	1,165	1,181	1,196	1,212
27	1,115	1,130	1,146	1,161	1,177	1,192	1,208
28	1,111	1,126	1,143	1,157	1,173	1,188	1,204
29	1,107	1,123	1,138	1,153	1,169	1,184	1,200
30	1,104	1,119	1,134	1,150	1,165	1,180	1,196

Примечание.

Прираще- ние давлени- я $\Delta B$ , мм рт. ст.	Интерполяция по давлению			Интерполяция по температуре		
	Поправка для $\Delta D$			Прираще- ние темпе- ратуры $\Delta t$ , °C	Поправка для $\Delta' D$	
	0,017	0,016	0,015		0,004	0,005
1	0,002	0,002	0,001	0,1	0,000	0,001
2	0,003	0,003	0,003	0,2	0,001	0,001
3	0,005	0,005	0,004	0,3	0,001	0,002
4	0,007	0,006	0,006	0,4	0,002	0,002
5	0,008	0,008	0,007	0,5	0,002	0,003
6	0,010	0,010	0,009	0,6	0,002	0,003
7	0,012	0,011	0,010	0,7	0,003	0,004
8	0,014	0,013	0,012	0,8	0,003	0,004
9	0,015	0,014	0,013	0,9	0,004	0,005

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Плотность ртути при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. (101325 Па), кг/м<sup>3</sup> [145]

t, °C	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
-30	13666,92	13664,43	13661,94	13659,46	13658,97	13654,49	13676,73	13674,39	13671,90	13669,41
-20	13642,08	13639,60	13637,12	13634,64	13632,16	13629,68	13652,00	13649,52	13647,04	13644,56
-10	13617,31	13614,84	13612,36	13609,89	13607,42	13604,95	13627,21	13624,73	13622,26	13619,78
0							13602,48	13600,02	13597,55	13595,08

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	13595,08	13592,61	13590,15	13587,68	13585,22	13582,76	13580,29	13577,83	13575,37	13572,91
10	13570,45	13567,99	13565,53	13563,07	13560,61	13558,16	13555,70	13553,25	13550,79	13548,34
20	13545,88	13543,43	13540,98	13538,53	13536,08	13533,63	13531,18	13528,73	13526,28	13523,83
30	13521,39	13518,94	13516,49	13514,05	13511,60	13509,16	13506,72	13504,27	13501,83	13499,39
40	13496,95	13494,51	13492,07	13489,63	13487,19	13484,75	13482,31	13479,88	13477,44	13475,01

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абас-Заде А. К., Апаев Т. А., Керимов А. М. Экспериментальное исследование плотности октана-1 и циклогексена в зависимости от температуры и давления. — Изв. АН АзССР, Сер. физ.-техн. и мат. наук, 1970, № 5, с. 70—73.
2. Абдуллаев А. А., Бунятов Г. С. Плотномер для нефтяной и нефтехимической промышленности. — Приборы и системы управления, 1976, № 9, с. 27—28.
3. Агаев Н. А., Юсубова А. Д., Пашаев А. А. Плотность жидкого 4-метилпентена-1 при высоких давлениях и различных температурах. — Инженерно-физический журнал, 1974, т. 27, № 5, с. 883—886.
4. Айвазов Б. В. Практикум по химии поверхностных явлений и адсорбции. М.: Высшая школа, 1973.
5. Александров А. А., Трахтенгерц М. С. Плотность воды при атмосферном давлении и температурах 0—100°C. — Теплоэнергетика, 1970, № 11, с. 86—90.
6. Андреев Г. А. Флотационный метод измерения плотности твердых тел и его применение. — Монокристаллы и техника. Харьков: 1973, вып. 2 (9), с. 1—20.
7. Ареометры для определения плотности глинистых растворов АГ-ЗПП. — В кн.: Меры и измерительные приборы, допущенные к выпуску в обращение в СССР. — М.: Изд-во стандартов, 1971, вып. 21, с. 151—154.
8. А. с. 330377 (СССР). Плотномер для газов/ Аронович Р. В., Величкин О. Д., Гойхман С. Я. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1972, № 8.
9. Арсламбеков В. А. Конструирование высокочувствительных весов для физико-химических исследований. М.: Наука, 1972.
10. Арцыбашев В. А. Гамма-метод измерения плотности. М.: Атомиздат, 1965.
11. Атанов Ю. А., Борзунов В. Н., Разумихин В. Н. Измерение сжимаемости жидкостей методом сильфонного пьезометра при давлениях до 10 000 кгс/см<sup>2</sup>. — Труды ин-тов Гос. комитета стандартов СССР, вып. 75 (135), 1964, с. 143—150.
12. Бабинов Ю. М., Рассказов Д. С. Органические и кремний-органические теплоносители. М.: Энергия, 1975.
13. Баламутова Э. А. Экспериментальное определение плотности паров и молекулярного веса бензина Б-70 и керосина Т-1. — Труды Моск. авиацион. ин-та, вып. 132, 1961, с. 123—143.
14. Басин А. С., Волчкова С. П., Соловьев А. Н. Исследование плотности легкоплавких металлов при переходе через точку плавления. — ПМТФ, 1969, № 6, с. 128—133.
15. А. с. 343194 (СССР). Способ измерения плотности газа/ Батенчук-Туско В. М., Римский-Корсаков А. В., Царский Е. Р. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1972, № 20.
16. Бернгардт В. В., Обновленский П. А. Плотномер для малых потоков жидкости. — В кн.: Теплоэнергетические и химико-технологические приборы и регуляторы. Л.: Машиностроение, 1968, с. 209—210.
17. Билевич А. В., Верещагин Л. Ф., Қалашников Я. А. Пьезометр для определения плотности газов при высоких давлениях и температурах. — Приборы и техника эксперимента, 1961, № 3, с. 146—150.
18. Бирюков Б. В., Данилов М. А., Квилис С. С. Испытательные расходомерные установки. М.: Энергия, 1976.
19. Благой Ю. П., Зозуля В. Н. Вязкость и плотность азота. — Труды Всесоюз. научн.-техн. конфер. по термодинамике. Сб. докладов секции «Теплофиз. свойства веществ», 1969, с. 199—207.
20. Бойко Н. В., Войтюк Б. В. Экспериментальное исследование плотности жидких углеводородов методом гидростатического взвешивания на тензометрических весах. — В кн.: Теплофизические характеристики веществ. М.: Изд-во стандартов, 1968, с. 33—37.
21. Борзунов В. А., Разумихин В. Н. Установка для измерения плотности жидкостей гидростатическим методом при давлениях до 10 000 кгс/см<sup>2</sup>. — Труды ин-тов Гос. комитета стандартов, СССР, 1964, вып. 75 (135), с. 134—142.
22. Бражников Н. И. Ультразвуковые методы измерения плотности вещества. — Приборы и системы управления, 1976, № 10, с. 17—21.
23. Быкова Н. А., Шевченко В. Г. Плотность и поверхностное натяжение меди, алюминия, галлия, индия и олова. — Труды ин-та химии УНЦ АН СССР, 1974, вып. 29, с. 42—47.
24. Вайншток М. Д. Автоматическое измерение плотности с температурной компенсацией. — Кокс и химия, 1964, № 9, с. 46—48.
25. Варварин Г. Б., Филиппов Е. М. Плотностной гамма-гамма-метод в геофизике. Новосибирск.: Наука, 1972.
26. Вертман А. А., Филиппов Е. С. Измерение плотности расплавов. — В кн.: Исследования металлов в жидком и твердом состояниях. М.: Наука, 1964, с. 100—121.
27. Викторов В. А., Лункин Б. В. Измерение количества и плотности различных сред. М.: Энергия, 1973.
28. Викторов Г. Г., Бондаренко В. М. Мюонный метод определения плотности горных пород. М.: Атомиздат, 1973.
29. А. с. 472286 (СССР). Импульсный плотномер/ Вязинкин В. Ф. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1975, № 20.
30. Гарт Г. Радиоизотопное измерение плотности жидкостей и бинарных систем. М.: Атомиздат, 1975.
31. Гафанович М. Д. Измерение расхода газа в промышленности. М.: Энергия, 1975.
32. Геллер З. И., Расторгуев Ю. Л., Судаков П. Е. Автоматический плотномер для потока конструкции ГНИ. — Изв. высш. учебн. заведений. Нефть и газ, 1962, № 2, с. 109—116.
33. А. с. 479990 (СССР). Прибор для определения плотности жидких и газовых сред/ Геллер З. И., Немировский Р. Я., Хаютин Ю. Д. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1975, № 29.

34. Глыбин И. П. Автоматические плотномеры. Киев.: Техника, 1965.
35. Глыбин И. П. Автоматические плотномеры и концентратомеры в пищевой промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1975.
36. Гойхман С. Я. Весовые и поплавковые плотномеры. — Приборы и системы управления, 1975, № 12, с. 20—24.
37. Голубев И. Ф., Добровольский О. А. Измерение плотности азота и водорода при низких температурах и высоких давлениях методом гидростатического взвешивания. — Газовая промышленность, 1964, № 5, с. 43—47.
38. Гольдин М. Л. Контроль и автоматизация процессов дробления и измельчения руд. М.: Атомиздат, 1971.
39. Государственный первичный эталон единицы плотности жидкости/ Кожихова Ж. Г., Кондратенко М. И., Степанов Л. П., Сурикова З. А. — Измерительная техника, 1972, № 8, с. 15—19.
40. Грищенко А. З., Бондаренко Г. Л., Корчак А. Н. Автоматическое регулирование концентрации щелочных растворов. — Химич. волокна, 1962, № 2, с. 49—52.
41. Гудков В. К., Стальнов П. И. Датчики уровня и плотности на основе пневмоповторителей. — Известия высш. учеб. заведений. Приборостроение, 1973, т. 16, № 1, с. 78—83.
42. Демин Е. А., Кирпатовский С. И., Руденко В. И. Измерение плотности жидкости весовым плотномером. — Приборы и системы управления, 1975, № 12, с. 18—19.
43. Дерягин Б. В., Чураев Н. В. Новые свойства жидкостей. М.: Наука, 1971.
44. А. с. 178156 (СССР). Прибор для измерения плотности/ Диденко К. И., Левин В. М., Ясоцкий В. И. — Оpubл. в бюл. «Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1966, № 2.
45. Добровольский О. А., Голубев И. Ф. Экспериментальное определение плотности жидкого аргона в интервале температур от —117 до —180°C при давлениях от 10 до 500 кгс/см<sup>2</sup>. — Труды ГИАП, 1971, вып. 8, с. 14—27.
46. Евстигнеев А. Н., Замыцкий И. А., Миронов Ю. И. Дистанционный цифровой измеритель плотности жидких сред. — В кн.: Интенсификация процессов и оборудования пищевых производств. Л. Т. И. 1976, с. 50—53.
47. Емельянов В. А. Полевая радиометрия влажности и плотности почвогрунтов. М.: Атомиздат, 1970.
48. Епанчинцев О. Г. Источники ошибок при определении плотности методом гидростатического взвешивания. — Заводская лаборатория, 1970, т. 36, № 5, с. 557—560.
49. А. с. 494659 (СССР). Пневматический плотномер жидкости/ Жидков Л. С., Авдеев В. П., Учитель Г. С. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1975, № 45.
50. А. с. 397813 (СССР). Плотномер/ Жихорева Н. Н., Зайцев В. В., Конин В. М. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1973, № 37.
51. Жмойдин Г. И., Байдов В. В. Источники погрешности определения плотности методом максимального давления в пузырьке. — Заводская лаборатория, 1973, т. 39, № 9, с. 1091—1095.
52. Жуков Ю. П., Бегунов В. Н. Измерение плотности жидких сред вибрационно-частотным методом. — Приборы и системы управления, 1976, № 9, с. 28—30.
53. Закутина Г. П. Анализ особенностей распределения документов по приборостроению в реферативном журнале ВИНТИ. — Научно-техн. информация, сер. 1, 1972, № 3, с. 24—28.
54. Залманзон Л. А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем. М.: Наука, 1973.
55. А. с. 276487 (СССР). Способ прецизионного измерения абсолютных значений плотности жидких сред/ Замятин А. А. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1970, № 23.
56. Зарембо В. И., Федоров М. К. Установка для измерения плотности растворов электролитов при температурах 25—400°C и давлениях до 2000 кгс/см<sup>2</sup>. — Журнал прикладной химии, 1975, т. 48, № 8, с. 1745—1749.
57. Зарецкий Л. И. Методика градуировки и поверки радиоизотопного плотномера. — Приборы и системы управления, 1976, № 10, с. 23—24.
58. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974.
59. Зубарев В. Н., Александров А. А. Практикум по технической термодинамике. М.: Энергия, 1971.
60. Иващенко Ю. Н., Марценюк П. С. Измерение плотности расплавов тугоплавких веществ. — Заводская лаборатория, 1973, т. 39, № 1, с. 42—45.
61. Иващенко Ю. Н., Марценюк П. С. Установка для измерения поверхностной энергии и плотности расплавов тугоплавких металлов. — Теплофизика высоких температур, 1973, № 6, с. 1285—1287.
62. Измерение массы, объема и плотности/ Гаузер С. И., Кивилис С. С., Осокина А. П., Павловский А. Н. М.: Изд-во стандартов, 1972.
63. Изотопный анализ воды/ Шатенштейн А. И., Яковлева Е. А., Звягинцева Е. Н. и др. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
64. Ильинский Г. А. Определение плотности минералов. Л.: Недра, 1975.
65. Иппиц М. Д., Тютикова М. И. Метод поверки ареометров в одной жидкости. — Измерительная техника, 1961, № 12, с. 17—21.
66. Иппиц М. Д., Тютикова М. И. Стекланный спиртомер с гирями. — Измерительная техника, 1964, № 5, с. 52—53.
67. Исследование вязкости и плотности системы сурьма — селен в жидком состоянии/ Андрианова Т. Н., Александров А. А., Разумейченко Л. А., Охотин В. С. — Теплофизика высоких температур, 1970, № 6, с. 1192—1196.
68. Казавчинский Я. З., Кессельман П. М., Кириллин В. А. Тяжелая вода. Теплофизические свойства. М.—Л.: Энергия, 1963.
69. Кац М. Я. Новые методы исследования минералов в гравитационном поле. М.: Наука, 1966.
70. Кацнельсон О. Г., Эдельштейн А. С. Автоматические измерительные приборы с магнитной подвеской. М.: Энергия, 1970.
71. Кацнельсон О. Г., Хонозон Г. А., Воробьев А. Н. Магнитная подвеска на постоянных магнитах. — Приборы и системы управления, 1970, № 7, с. 29—31.
72. Кивилис С. С. Направления развития промышленных плотномеров. — Приборы и системы управления, 1975, № 12, с. 14—18.

73. Кивилис С. С. Промышленные плотномеры. — В кн.: Метрология и измерительная техника. Т. 3 (Итоги науки и техн. ВИНТИ АН СССР). М.: ВИНТИ, 1975, с. 285—313.

74. Кириллин В. А., Шейндлин А. Е. Исследования термодинамических свойств веществ. М.: Госэнергоиздат, 1963.

74а. Княсбейли А. Ш., Перельштейн М. Е. Вихревые измерительные приборы. М.: Машиностроение, 1978.

75. Клемпнер К. С., Чередниченко И. М. Вероятностный анализ при проектировании радиоизотопных приборов. М.: Атомиздат, 1971.

76. Кляхин В. А., Бадиков В. В. Об определении плотности тяжелых минералов пикнометрическим методом. — В кн.: Материалы по генетической и эксперимент. минералогии. Т. 3. М.: Наука, 1965, с. 303—313.

77. Коллеров Д. К., Панова Е. С. Температурные поправки плотности нефтепродуктов. — Труды метрол. ин-тов СССР, 1968, вып. 96, с. 123—138.

78. Кондратенко М. И. Измерение плотности жидкости образцовыми ареометрами (денсиметрами). — Труды метрол. ин-тов СССР, 1975, вып. 161 (221), с. 81—86.

79. Котляр Г. И., Магдасиев В. А., Клим Б. В. Плотномер. — Приборы и системы управления, 1976, № 9, с. 33—34.

80. А. с. 372477 (СССР). Устройство для измерения плотности жидкости/ Котляр Г. И., Котляр Л. С. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1973, № 13.

81. Курочкин М. П., Устивицкий Н. П., Эйзов П. О. — Приборы и системы управления, 1972, № 7, с. 46—47.

82. Лыгач В. Н., Масленников Б. М., Сергеев В. П. Некоторые вопросы расчета пьезометрических датчиков. — Труды НИИ горнохим. сырья, 1969, вып. 15, с. 175—182.

83. Мавлянкариев Б. А., Юсупбеков Н. Р., Гулямов Ш. М. Плотномеры для жидкостей. — Приборы и системы управления, 1975, № 12, с. 25—26.

84. Макаренко И. Н., Николаенко А. М., Иванов В. А. Уравнение состояния щелочных металлов: натрий. — Журнал эксперимент. и теор. физики, 1975, т. 69, № 5, с. 1723—1733.

✓ 85. Маловичко В. А., Аникеев В. А., Ткаченко М. Ф. Использование эффекта присоединенной массы для измерения плотности растворов. — Известия Томск. политех. ин-та, 1970, вып. 184, с. 44—47.

✓ 86. Марюта А. Н. Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование устройства для непрерывного измерения плотности пульпы в падающем потоке. — В кн.: Горная электромеханика и автоматика. Харьков: Б. и., 1966, с. 62—66.

87. Менделеев Д. И. Сочинения. Т. XXII. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1950.

88. А. с. 454454 (СССР). Датчик плотности жидких сред/ Меньшиков В. С., Учитель Г. С., Авдеев В. П. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1974, № 47.

89. Методы испытаний, контроля и исследований машиностроительных материалов. Справочное пособие. Т. 1. М.: Машиностроение, 1971.

90. Миновский А. И., Дяченко М. А. Ультразвуковой концентратомер для ряда сред. — Автоматиз. хим. произв., 1973, вып. 9, с. 191—194.

91. Мирошников А. П., Разумихин В. Н. Метод измерения плотности (сжимаемости) жидкостей при давлении до  $1 \cdot 10^9$  Па. — Научные приборы, 1976, № 12, с. 65—68.

✓ 92. Мирошников А. П. Механизм автоматического нагружения гидростатических весов под давлением. — Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та физ.-техн. и радиотехн. измерений, 1974, вып. 11 (41), с. 88—91.

✓ 93. Митин Б. С., Нагибин Ю. А. Установка для измерения плотности жидкостей при высоких температурах. — Заводская лаборатория, 1970, т. 36, № 10, с. 1279—1280.

94. Мороховский А. С. Анализ погрешностей весовых плотномеров для трубопроводного гидротранспорта. — Приборы и системы управления, 1975, № 12, с. 27—29.

95. Мороховский А. С. Совершенствование массовых плотномеров для напорного гидротранспорта. — Угольное и горнорудное оборудование, 1973, № 5, с. 40—42.

96. Наладка приборов и устройств технологического контроля/ Под общ. ред. А. С. Ключева. М.: Энергия, 1976.

97. Наумов А. Ф., Мамаев Н. А., Пудкова З. Н. Поплавковый метод определения изменения плотности твердых тел, растворяющихся во флотационной жидкости. — Заводская лаборатория, 1973, т. 39, № 3, с. 292—293.

98. Нестерихин Ю. Е., Солоухин Р. И. Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы. М.: Наука, 1967.

99. Нечаев А. Н. Новые лабораторные весы и весовые установки. — Труды метрол. ин-тов СССР, 1972, вып. 132 (192), с. 93—95.

100. А. с. 483350 (СССР). Резонансный датчик плотности жидких и сыпучих сред/ Нечаев Б. Н., Капобашвили Я. Р., Плиско Г. Р. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1975, № 33.

101. Никитин С. Н. Гидродинамический метод измерения плотности пульпы. — Обогащение и брикетир. угля, 1965, № 3 (42), с. 22—23.

✓ 102. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974.

103. Носов В. А. Проектирование ультразвуковой измерительной аппаратуры. М.: Машиностроение, 1972.

✓ 104. Образцовая установка для исследования РVT-зависимости жидкостей методом гидростатического взвешивания/ Войтюк Б. В., Рабинович В. А., Мосейчук Л. В., Денисенко А. А. — В кн.: Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов, 1975, вып. 8, с. 246—256.

105. Определение плотности и относительного веса газа. — В кн.: Справочник по транспорту горючих газов/ Под ред. Зарембо К. С. М.: Гостоптехиздат, 1962, с. 90—98.

106. Осовецкий Б. М. Метод определения плотности мелких минеральных частиц по скорости падения в бромформе. — Зап. Всес. минерал. общества, 1976, т. 105, № 3, с. 392—396.

107. Парфенов В. И. Температурная компенсация в гидростатических плотномерах. — Приборы и системы управления, 1976, № 10, с. 24—25.

9 108. Петров И. К. Инженерный метод расчета плотномера с поворачивающимся поплавком. — Приборы и системы управления, 1972, № 11, с. 46—47.

109. А. с. 393641 (СССР). Устройство для измерения плотности газов и жидкостей/ Пистун Е. П., Фабри Л. П., Кос В. М. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1973, № 33.

110. А. с. 441474 (СССР). Способ определения плотности газа/ Плотников М. А. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1974, № 32.

111. Плотномер жидкости/ Даудрих Д. Д., Куликов А. А., Гумбин Е. П., Тюлин Ю. В. — В кн.: Средства контроля и регулирования. Л.: Химия, 1974, с. 93—96.

112. Плотность, вязкость и поверхностное натяжение четыреххлористого углерода и четыреххлористого олова/ Пугачевич П. П., Ниссельсон Л. А., Соколова Т. Д., Ануров Н. С. — Журнал неорг. химии, 1963, т. 8, № 4, с. 791—796.

113. Повидайло В. А., Силина Л. А. Влияние скорости сжатия газа на точность измерения объема твердых тел пневматическим методом. — Вопросы кибернетики, вып. 43. Ташкент: Б. и., 1971, с. 98—104.

114. Портной Ю. В. Основы применения ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1971.

115. Правила 28—64 измерения расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами. М.: Изд-во стандартов, 1977.

116. Прозоров Ю. П. Автоматизация водно-шламового хозяйства углеобогащительных фабрик. Киев.: УкрНИИТИ, 1968.

117. Прозоров Ю. П. Ультразвуковой плотномер для угольных пульп. — Уголь Украины, 1968, № 10, с. 45—47.

118. Пугачев А. В., Сахаров Э. В. Справочник по радиоизотопной автоматике. М.: Энергия, 1974.

119. Радиационные методы контроля и измерений в гидротехнике/ Беликов М. П., Бескин Л. И., Богданов И. Я. и др. — М.: Стройиздат, 1972.

120. Радиоизотопный плотномер ПР-1025/ Бетин Ю. П., Верховский Б. И., Котик У. И. и др. — Изотопы в СССР, 1976, № 48, с. 11—13.

121. Разин К. А. Плотномер космических станций «Венера-5» и «Венера-6». — Приборы и системы управления, 1971, № 10, с. 39—40.

122. Разумихин В. Н., Мирошников А. П. Гидростатические весы для измерения плотности вязких жидкостей под давлением. — Труды Всес. науч.-исслед. ин-та физ.-техн. и радиотехн. измерений, 1974, вып. 11 (41), с. 54—56.

123. Разумихин В. Н. Гидростатический метод определения плотности жидкости при давлениях до 5000 кгс/см<sup>2</sup>. — Труды Всес. науч.-исслед. ин-та физ.-техн. и радиотехн. измерений, 1969, 46 (106), с. 96—106.

124. Разумихин В. Н., Борзунов В. А., Стекольников В. А. Зависимость плотности *n*-гексана и воды от давления. — Труды метрол. ин-тов СССР, 1969, вып. 104 (164), с. 92—98.

125. Реппо Э. А. Пикнометрический анализ почв и грунтов. Таллин.: Валгус, 1968.

126. Руденко Н. С., Слюсарь В. П. Плотность жидкого дейтериеводорода. — Журнал физ. химии, 1969, т. 43, № 3, с. 781—782.

127. Рудик М. П., Беляков В. П., Яссон Ю. Б. Радиоизотопный метод измерения плотности криогенных жидкостей. — Приборы и системы управления, 1976, № 10, с. 21—23.

128. Рыбаков В. В., Грачев Б. А. Весовой плотномер АВП-1. — Приборы и системы управления, 1975, № 12, с. 19—20.

129. Рыбин В. В., Кузнецов В. Г., Шульгин В. Н. Компенсационные датчики поглощения ультразвука. — Труды Рязан. радиотехн. ин-та, 1970, вып. 2, с. 91—97.

130. А. с. 524102 (СССР). Гидростатический плотномер/ Сагайда И. М., Дубров В. К. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1976, № 29.

131. Сарахов А. И. Весы в физико-химических исследованиях. М.: Наука, 1968.

132. А. с. 457009 (СССР). Ареометр для жидких сред/ Сечинский Ю. М., Брен М. О. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1975, № 2.

133. Смирнова Н. А., Торопин С. И. Определение плотности твердых тел. — Измерительная техника, 1967, № 4, с. 46—48.

134. Сорокин Н. И., Ляшко Н. А., Копаница Д. Н. К вопросу измерения плотности угольной пыли по поглощению ультразвука. — Труды Гос. проект.-констр. ин-та Гипромашуглеобогащение, 1971, вып. 3, с. 372—380.

135. Справочник химика. 3-е изд., т. 1. Л.: Химия, 1971.

136. Справочник химика. 3-е изд., т. 2. Л.: Химия, 1971.

137. Степанов Л. П., Тихонова Л. И. Заменитель бензола при проверке ареометров. — Труды метрол. ин-тов СССР, 1975, вып. 161 (221), с. 87—90.

138. Степанов Л. П., Новая градуировка гидростатических весов безменного типа (весов Вестфаля). — Труды метрол. ин-тов СССР, 1959, вып. 37 (97), с. 149—152.

139. Степанов Л. П. Учет вязкости при измерении плотности жидкости гидростатическим методом. — Измерительная техника, 1970, № 11, с. 50—52.

140. Столяров Е. А., Орлова Н. Г. Расчет физико-химических свойств жидкостей. Справочник. Л.: Химия, 1976.

141. Таблицы для определения содержания этилового спирта в водно-спиртовых растворах. М.: Изд-во стандартов, 1979.

142. Таблицы физических величин. Справочник/ Под ред. Кирикова И. К. М.: Атомиздат, 1976.

143. А. с. 259456 (СССР). Способ определения плотности жидких сред/ Тавадзе Ф. Н., Хантадзе Д. В., Церивадзе Т. Г. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1970, № 2.

144. Ташпулатов Х. П., Ниязов М. И., Юсупбеков Н. Р. Исследование влияния гидродинамических условий потока жидкости на погрешность поплавкового плотнмера. — Труды Ташкентск. политехн. ин-та, 1968, вып. 42, с. 7—11.

145. Теплофизические свойства ртути/ Вукалович М. П., Иванов А. И., Фокин П. Р., Яковлев А. Т. М.: Изд-во стандартов, 1971.

146. Теплофизические свойства щелочных металлов/ Шпильрайн Э. Э., Якимович К. А., Тощкий Е. Е. и др. М.: Изд-во стандартов, 1970.

147. Торопин С. И. Измерение плотности жидкостей, массы и объемов твердых тел при помощи усовершенствованных ареометрических весов. — Измерительная техника, 1971, № 1, с. 66—68.

148. Торопин С. И., Снегов В. С. Определение плотности воздуха для вычисления поправки на аэростатическую силу при точных измерениях массы. — Измерительная техника, 1975, № 12, с. 75.
149. Торопин С. И., Руденко А. Т., Светлакова Л. Ф. — Установка для определения плотности пористых и сыпучих тел. — Измерительная техника, 1972, № 12, с. 62—63.
150. Труды Всесоюзной науч.-техн. конференции по термодинамике. — Сб. докладов секции «Теплофизические свойства веществ». М.: Наука, 1969.
151. Тхоржевский В. П. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. М.: Химия, 1976.
152. Ураксеев М. А., Исмагуллаев П. Р. Плотномер для жидкостей. — Приборы и системы управления, 1975, № 12, с. 29—30.
153. Фарзани Н. Г., Илясов Л. В., Насибов С. Р. Импульсный эффузионный газовый плотномер. — Автоматиз. и контрольно-измерит. приборы в нефтеперераб. и нефтехим. пром-сти. Научн.-техн. реф. сб., 1976, № 2, с. 8—12.
154. Фарзани Н. Г., Илясов Л. В., Насибов С. Р. Пневматический датчик плотности газов. — Приборы и системы управления, 1969, № 1, с. 9—11.
155. Фахреев И. А., Мархасин И. Л., Малышева Л. Н. Определение плотности жидкости под давлением пикнометрическим методом. — Труды Уфимск. нефт. науч.-исслед. ин-та, 1963, вып. 9—10, с. 508—515.
156. Фельдблюм П. Л., Хмельницкая Е. А. Анализ вибросистемного метода измерения плотности. — Труды ВНИИКАНЕФТЕГАЗ, 1968, вып. 2, с. 18—26.
157. А. с. 269546 (СССР). Вибросистемный плотномер/ Фельдблюм П. Л., Пекин С. Ф., Мальцев А. В. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1970, № 15.
158. А. с. 400838 (СССР). Датчик вибрационного плотнмера/ Фельдблюм П. Л., Лебедев Л. Л., Пекин С. Ф. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1973, № 40.
159. А. с. 303562 (СССР). Датчик плотности/ Фельдблюм П. Л., Пекин С. Ф., Портер Л. Г. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1971, № 16.
160. А. с. 314115 (СССР). Способ определения плотности твердых тел/ Фомин И. Н., Вергман А. А., Андреева О. В. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1971, № 27.
161. А. с. 139217 (СССР). Способ измерения уровня и плотности псевдосжиженного слоя/ Хотатуров М. А. — Оpubл. в «Бюл. изобрет. и товарных знаков», 1961, № 12.
162. Цейтлин В. Г. Турбопоршневой метод измерения массового расхода и плотности жидкостей. — Измерительная техника, 1964, № 2, с. 34—37.
163. Циклис Д. С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. М.: Химия, 1976.
164. Частотно-ферродинамическая система приборов контроля и управления/ Диденко К. И., Гафанович М. Д., Брауде В. А. и др. М.: Энергия, 1970.

165. Черкасов И. И. Начала грунтоведения Луны. М.: Наука, 1971.
166. Чернов Р. В., Яковлев Б. В. Амплитудно-вибрационный метод измерения плотности жидких веществ. — Журнал физ. химии, 1975, т. 49, № 9, с. 2448—2450.
167. Шевченко В. Г. Установка для измерения плотности металлических расплавов. — Труды ин-та химии УНЦ АН СССР, 1974, вып. 29, с. 69—73.
168. Шпильрайн Э. Э., Якимович К. А., Цицаркин А. Д. Исследование плотности расплавленной окиси бора при высоких температурах методом гидродинамического взвешивания. — Теплофизика высоких температур, 1971, т. 9, № 1, с. 67—73.
169. Шпильрайн Э. Э., Якимович К. А., Цицаркин А. Ф. Экспериментальное исследование плотности и поверхностного натяжения жидкой окиси бериллия. — Теплофизика высоких температур, 1974, т. 12, № 2, с. 277—281.
170. Эйгенброт В. М., Белоусов Ю. М. Частотные методы измерения плотности гидросмесей в потоке. — Приборы и системы управления, 1976, № 9, с. 30—32.
171. А. с. 276486 (СССР). Плотномер/ Эльшанский И. И. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1970, № 23.
172. А. с. 495585 (СССР). Плотномер для суспензий и пульпы/ Юсупбеков Н. Р., Мавлянкариев Б. А., Гулямов Ш. М. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1975, № 46.
173. Almeida S. P., Crouch T. H. Magnetic densimeter using an rf sensing coil. — Rev. Sci. Instrum., 1971, vol. 42, № 9, p. 1344—1348.
174. Babb S. E., Jr., Scott G. J., Epp C. D. Apparatus for PVT measurements of gases to 10 kilobars. — Rev. Scient. Instrum., 1969, vol. 40, № 5, p. 670—675.
175. Пат. № 3688188 (США).
176. Пат. № 1295617 (Англия).
177. Beams J. W., Clarke A. M. Magnetic suspension balance method for determining densities and partial specific volumes. — Rev. Sci. Instrum., 1962, vol. 33, № 7, p. 750—753.
178. Blanchard E. F. Density measurement with an orifice meter. — W. Va Univ. Eng. Exp. Stat. Bull., 1971, № 105, p. 195—202.
179. Blanchard M. B. Method for determining the density of microsize spherical particles. — Bull. Geol. Soc. America, 1967, vol. 78, № 3, p. 385—403.
180. Blyth J. Device for measuring density and for separation of particles by their density differences. — Lab. Pract., 1972, vol. 21, № 12, p. 875—878.
181. Bowman H. A., Schoonover R. M. Density comparison technique. — Instrum. and Control Syst., 1967, vol. 40, № 2, p. 88, 89.
182. Bowman H. A., Gallagher W., Schoonover M. R. The development of a working density standard. — 20th Annual. ISA Conf. Proc., Los Angeles, 1965, vol. 20, pt 1, p. 1—6.
183. Bowman H. A., Gallagher W. H. An improved high — precision calibration procedure for reference standard hydrometers. — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1969, C 73, № 3—4, p. 57—65.
184. Пат. № 3967490 (США).



185. **Breier J., Gatzmanga H., Kathe H.** Betriebliches Dichtemessgerät. — Mes. — Steuern — Regeln, 1971, Bd 14, № 3; Automatisierungspraxis, Bd 8, № 3, S. 56—58.
186. **Brulmans J., Eschbach H. L.** Procedure for simple, high precision density determinations of air for buoyancy corrections. — Rev. Sci. Instrum., 1970, vol. 41, № 11, p. 1680—1681.
187. **Budworth D. W.** Calibration curves for density-gradient columns. — J. Scient. Instrum., 1962, vol. 39, № 7, p. 377—378.
188. **Cantor S.** Metal dilatometer for determining density and expansivity of volatile liquids at elevated temperature. — Rev. Sci. Instrum., 1969, vol. 40, № 7, p. 967—968.
189. Пат. № 1432165 (Англия).
190. Пат. № 937827 (Англия).
191. **Clarke A. L.** Density determination on small liquid samples. — J. Scient. Instrum., 1967, vol. 44, № 5, p. 382—384.
192. **Crawley A. F.** Densities of liquid metals and alloys. — Int. Met. Revs, 1974, vol. 19, March, p. 32—48.
193. **Creitz E. C.** Gas density balance design considerations. — J. Res. Nat. Bur. Standards, 1968, C72, № 3, p. 187—195.
194. Пат. № 1277403 (Англия).
195. Пат. № 3295360 (США).
196. Пат. № 1474026 (Франция).
197. Пат. № 1572643 (Франция).
198. **Dorsch D.** Stimmgabel-Gasdichtemesser mit linearisierter Kennlinie. — Chem. — Ingr — Techn., 1969, Bd 41, № 17, S. 598—962.
199. Пат. 925366 (Англия).
200. **Emmet R. T., Millero F. J.** Direct measurement of the specific volume of seawater from —2 to 40° C. — J. Geophys. Res., 1974, vol. 79, № 24, p. 3463—3472.
201. **Felsovályi G.** Rezgorendszeru ipari suruségérzékelo. — Automatizálás, 1976, vol. 9, № 3, S. 4—9.
202. Пат. № 3726128 (США).
203. **Folland D. F.** Fluidic density measurement. — Instrum. and Control Syst., 1968, vol. 41, № 4, p. 97—99.
204. Пат. № 3697750 (США).
205. Пат. № 3766786 (США).
206. **Green E., Grimm M. J.** Density by hydrostatic weighing. — Metrologia, 1970, vol. 6, № 4, p. 142—149.
207. **Greer S. C., Moldover M. R., Hocken R.** A differential transformer as a position detector in a magnetic densimeter. — Rev. Sci. Instrum., 1974, vol. 45, № 11, p. 1462—1463.
208. **Grigor A. F., Steele W. A.** Density balance for low temperatures and elevated pressures. — Rev. Scient. Instrum., 1966, vol. 37, № 1, p. 51—54.
209. **Goldmann G., Tödheide K.** Measurement of PVT data for molten potassium chloride to 1320K and 6 kbar. — Z. Naturforsch., 1976, vol. 31a, № 6, p. 656—663.
210. **Hales J. L.** An apparatus for accurate measurement of liquid densities over an extended temperature range. — J. Phys. E: Sci. Instrum., 1970, vol. 3, № 11, p. 855—861.
211. **Hales J. L.** Measurement of fluid density with a magnetically levitated archimedean bob. — 4 ème Conf. int. thermodyn. chim., Montpellier, 1975, vol. 8, p. 5—10.
212. **Haworth W. S., Sutton L. E.** A high resolution gas density balance. — J. Phys., 1970, E3, № 4, p. 271—274.

213. **Haynes W. M.** Magnetic suspension densimeter for measurements on fluids of cryogenic interest. — Rev. Sci. Instrum., 1976, vol. 47, № 10, p. 1237—1250.

214. **Haynes W. M., Stewart J. W.** A magnetic densimeter for low temperatures and high pressures. — Rev. Sci. Instrum., 1971, vol. 42, № 8, p. 1141—1150.

215. **Heibig W.** Die Oberflächenspannung und ihre Messung. — In: Handbuch der Messtechnik in der Betriebskontrolle. Ed. Hartman W., 1973, Bd 6, Kap. 4, S. 77—97.

216. **Herbst G.** Über die Bestimmung des Dichteverhältnisses von Gasen nach dem Wägevverfahren. — Ges. Ber. Ruhrgas, 1963, H. 12, S. 25—29.

217. Пат. № 2011716 (ФРГ).

218. Пат. № 3392588 (США).

219. **Hodgins M. G., Beams J. W.** Magnetic densimeter-viscometer. — Rev. Sci. Instrum., 1971, vol. 42, № 10, p. 1455—1457.

220. **Holbein G.** Betriebsgrößenmessung mit Zustandskorrektur. — Elek.-Anz., 1971, Bd 24, № 8, S. 175—178.

221. Пат. № 3855845 (США).

222. Пат. № 1414475 (Англия).

223. **Hubbard A. B.** Density measurement and its application to orifice metering. — Gas (USA), 1964, vol. 40, № 4, p. 72—73, 76—78.

224. Пат. № 3339399 (США).

225. **Husband L. J. B.** The use of a manometric densitometer for molten salts. — J. Sci. Instr., 1958, № 8, p. 300—301.

226. **Iwanski S., Habraszka J., Koszmider A.** Gęstościomierzy cieczy zawieszinowej do wzbogacania kopalni użytecznych. — Rudy i metale niezel, 1976, vol. 21, № 6, S. 209—212.

227. Пат. № 2086671 (Франция).

228. Пат. № 3451257 (США).

229. Пат. № 3808893 (США).

230. **Kell G. S., Whalley E.** The PVT properties of water. — Phil. Trans. Roy. Soc., 1965, A.258, № 1094, p. 565—614.

231. **Keramati B., Wolgemuth C. H.** Device for the direct measurement of fluid densities. — Rev. Sci. Instrum., 1975, vol. 46, № 11, p. 1573—1577.

232. **Kibort B.** Ultradźwiękowy miernik gęstości cieczy. — Arch. akust., 1973, vol. 8, № 1, S. 123—127.

233. **Kimmell G. O.** Dynamic measurement of specific gravity of gas by the gravity centrifuge. — Techn. Bull. Engng Exp. Stat. W. Va Univ., 1968, № 87, p. 189—201.

234. Пат. № 1443789 (Англия).

235. Пат. № 68391 (ГДР).

236. **Knobler C. M., Pings C. J.** Saturated liquid density of carbon tetrafluoride from 90° to 150° K. — Journ. Chem. Eng. Data, 1965, vol. 10, № 2, p. 129—130.

237. **Konopicky K., Tkotz G., Kowalczyk F.** Ermittlung der Dichte mit Hilfe eines Luftvergleichspyknometers. — Tonind.-Ztg., 1965, Bd 89, № 17—18, S. 402—405.

238. **Kruis A., Sauer mann D.** Die Linde-Gassäulenwaage. — Linde — Ber. Techn. und Wiss., 1967, № 24, S. 66—72.

239. Пат. № 1177849 (ФРГ).

240. **Ledley R. E.** Pycnometer holder. — Industrial and Engineering Chemistry. Analytical edition, 1946, vol. 18, № 1, p. 72.

241. Lobb R. C., Ratcliffe R. T., Harris J. E. The measurement of small density change in highly radioactive materials. — In: Post-irradiat. Exam. Techn. Proc. Eur. Conf., 1972. London, 1972, p. 129—131.
242. Пат. № 1385686 (Англия).
243. Lucas L. — D. Liquid density measurements. — Techniques of Metal Research, R. F. Bunshah, ed. New York, 1970, vol. IV, pt 2, p. 219.
244. Пат. № 806748 (Англия).
245. Пат. № 1171369 (Англия).
246. Martinez J., Walls H. A. Density of liquid thallium. — Met. Trans., 1973, vol. 4, № 5, p. 1419—1421.
247. McClune C. R. Measurement of the densities of liquefied hydrocarbons from 93 to 173 K. — Cryogenics, 1976, vol. 16, № 5, p. 289—295.
248. Mendenhall W., Ott L. A method for the calibration of an on-line density meter. — J. Qual. Technol., 1971, vol. 3, № 2, p. 80—86.
249. Messen und Regeln. Hengstenberg J. Red., 2 Aufl., Berlin, Springer, 1964, S. 1529—1532.
250. Пат. № 3878710 (США).
251. Пат. 3471000 (США).
252. Nakajima H. Densities of binary liquid Cd-, In-, Sn- and Sb-Ag alloys. — Trans. Jap. Inst. Metals, 1974, vol. 15, № 4, p. 301—303.
253. Napier B. A., Spencer D. H. T. An apparatus for the determination of the apparent densities of lump solids at elevated temperatures. — J. Scient. Instrum., 1967, vol. 44, № 7, p. 568—569.
254. November M. H. Electronic density-measuring system is accurate, versatile. — Oil and Gas J., 1972, vol. 70, № 8, p. 62—64.
255. On-line density meter. — Cryog. Inform. Rept. 1973, vol. 11, p. 14—15.
256. Пат. № 3765224 (США).
257. Pelsmaekers J., Amelincky S. Simple apparatus for comparative density measurements. — Rev. Sci. Instrum., 1961, vol. 32, № 7, p. 828—830.
258. Пат. № 1439256 (Франция).
259. Perrin C. Du nouveau dans le pétrole: le densimètre Solartron Schlumberger. — Pétrole informs, 1973, № 1266, p. 19—21.
260. Powley C. Vibrating spool fluid density meter tunes in to process control. — Process Eng., 1973, July, p. 84—86.
261. Пат. № 3477275 (США).
262. Rose K. S. B., Williams J., Potts G. A technique for measuring the density of small fragments of high-density materials both before and after irradiation. — J. Nucl. Mater., 1974, vol. 51, № 2, p. 195—198.
263. Sage P. K. Industrial measurement of liquid density. — Instrum. Practice, 1968, vol. 22, № 9, p. 767—772.
264. Пат. № 3581556 (США).
265. Пат. № 3926035 (США).
266. Пат. № 3934127 (США).
267. Schoeneck H., Wanniger W. Ein einfaches Relativverfahren zur Prüfung von Flüssiggasärömetern. — PTB — Mitt; 1964, Bd 74, № 4, S. 342—343.

268. Schoeneck H., Wanninger W. Verfahren zur fundamentalen Bestimmung der Fehler von Normalärömetern. — Amtsbl. Phys.-Techn. Bundesanstalt, 1957, № 1, S. 44—46.
269. Schweiger M. Drehkörper- und Drehmomentdichtemesseinrichtung. — Chem. Techn., 1969, Bd 21, № 10, S. 629—634.
270. Пат. № 1429352 (Франция).
271. Sens M. Densimétrie industrielle de haute précision. — Chimie ind.-Génie chimique, 1973, vol. 106, № 4, p. 233—242.
272. Sezaki K., Kuhlmann-Wilsdorf D. An improved technique for the measurement of smallest density changes in macroscopic specimens, applicable to the study of crystal defects. — J. Austral. Inst. Metals, 1963, vol. 8, № 2, p. 164—170.
273. Пат. № 1280997 (Англия).
274. Stirling P. H., Ho H. Determining density. — Industr. and Engng Chem., 1961, vol. 53, № 10, p. A48—A50.
275. Taylor J. K. Measurement of density and specific gravity. — Treatise on Analytical Chemistry. New York, Interscience publ., 1968, pt 7, vol. 7, p. 4561—4610.
276. Tilz G. P., Leopold H., Heschl R. Dichtemessung an Blut und Serum mit Hilfe ungedämpfter Schwingungen: ein neues Messprinzip im medizinisch-chemischen Laboratorium. — G—I—T, 1972, Bd 16, № 9, S. 1048—1050.
277. Tisinger R. M. Buoyancy microbalance for measuring gas densities. — Rev. Scient. Instrum., 1967, vol. 38, № 4, p. 547—550.
278. Wagenbreth H., Blanke W. Die Dichte des Wassers im internationalen Einheitensystem und in der internationalen praktischen Temperaturskala von 1968. — PTB — Mitt., 1971, Bd 81, № 6, S. 412—415.
279. Watanabe H., Senda O., Okamoto Y. Measurement of gas density by buoyancy method. — Кэйрё кэнкюсё хококу, Rept Nat. Res. Lab. Metrol., 1976, vol. 25, № 1, p. 35—39.
280. Wenger N. C., Smetana J. Hydrogen density measurements using an openended microwave cavity. — IEEE Trans. Instrum. and Meas., 1972, vol. 21, № 2, p. 105—114.
281. Wirth R. G. New, unique device for measuring density and specific gravity in the process control industry. — In: Adv. Instrum., vol. 30, pt 3. Pittsburgh, Pa, 1975, p. 705/1—705/6.
282. Пат. № 3827306 (США).
283. Пат. № 49—43907 (Япония).
284. Пат. № 17553 (Япония).
285. Пат. № 51-24901 (Япония).
286. Харада С. Вибрационные плотномеры. — Хайкан, Piping and Pipeline Syst., 1972, vol. 7, № 1, p. 31—34.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Ареометры:  
полного погружения 61  
постоянной массы 33  
постоянного объема 30  
пружинные 65  
цепочковые 62  
частичного погружения 25  
Ареопикнометры:  
для жидкостей 158  
— глинистых растворов 160  
Гидрометры 40  
Гидростатические весы 79  
ареометрические 96  
для высоких давлений 90  
модифицированные 71  
пружинные 99  
Гидростатическое взвешивание 71  
Давление молекулярное 18, 21  
Денсиметры 31  
АК 38  
аккумуляторные 38  
для молока 37  
— морской воды 37  
— мочи 37  
— нефти 36  
общего назначения 35  
Дилатометры 149  
Жидкости:  
поверочные 57  
рабочие 74  
флотационные 112  
Импеданс акустический 223  
Интенсивность ультразвука 223  
Капиллярная постоянная 22  
Клемеры 39  
Концентрация:  
массовая 16  
объемная 16  
Коэффициент:  
поверхностного натяжения 19  
расхода 167  
сжимаемости 14  
— адиабатической 222  
теплового расширения 11  
Краевой угол 21  
Лактоденсиметры 37  
Мениск 21, 26  
Метод(ы) измерения:  
ареометрический 25  
вибрационный 234

Метод измерения:  
вихревой 257  
вытеснения 152  
гидростатический 162  
гидростатического взвешивания 66  
дифференциальные 75, 138, 144  
капельные 172, 175  
пикнометрический 125  
последовательных расширений 152  
радиоизотопный 253  
ультразвуковые 223  
флотационно-скоростной 178  
флотационный 101  
Микрокапельницы 174  
Микропипетки 174  
Молекулярное давление 18, 21

Натяжение поверхностное 19  
Нефтеденсиметры 36  
Нормальная температура ареометра 45  
Нормальное состояние газа 15

Объем балластный 150  
Объемометры 61  
двухкамерные 158  
газовые 156  
жидкостные 155

Перепад давления балластный 203, 211  
Пикнометры:  
для газов 140  
— жидкостей 133  
Плотнометры вибрационные 234  
амплитудные 234, 236, 237  
двухрезонаторные 247  
камертонные 236, 238, 240, 242, 243  
маятниковые 244, 245  
погружные 237, 243, 248  
проточные 238, 240, 242, 244  
с резонатором пластинчатым 252  
— — трубчатым 251  
— — цилиндрическим 248, 249, 251  
частотные 235  
Плотнометры вихревые 257  
Плотнометры гидродинамические:  
капельные 172  
силовые 220  
скоростные 172, 175  
струйные 166, 221  
турбинные 216  
центробежные 218  
эффузионные 166

Плотнометры объемно-весовые 125, 191  
адсорбционные 160  
гидростатические 162, 200  
дифференциальные для газов 165, 206  
— — жидкостей 162, 200, 201  
колокольные 206  
мембранные 201, 204, 206  
петлеобразные 195, 198  
с пневмоповторителями 209  
— подвижным сосудом 191  
— продувкой газа 164, 209  
— сообщающимися сосудами 204  
сильфонные 202  
тензорезисторные 192  
трубные 192  
U-образные 163  
Плотнометры поплавок-весовые 66, 179  
градиентные 117  
коромысловые 78, 92, 189  
пружинные 98  
флотационные 101  
электромагнитные 100, 188  
Плотнометры поплавок-весовые 179  
двухпоплавок-весовые 183  
с поплавком плавающим 180, 192  
— — поворотным 189  
— — погруженным 184, 186  
цепочковые 184  
Плотнометры радиоизотопные 253  
с ионизационной камерой 255  
— поглощением излучения 254  
— рассеянием излучения 254  
со сцинтилляционным счетчиком 256  
Плотнометры ультразвуковые 222  
автоциркуляционные 224  
амплитудно-временной 231  
амплитудно-частотный 231  
импедансно-скоростные 230  
импедансные 227  
время-импульсные 223  
интерферометрические 225  
резонансные 225  
с акустическим фильтром 225

Плотнометры:  
— с поглощением звуковой энергии 233  
со скоростной реакцией волновода 226  
скоростные 223  
фазовые 225  
Плотность:  
воздуха 68, 260  
дистиллированной воды 259  
относительная 7  
ртуты 261  
Поверка:  
ареометров 57  
гидростатических весов 88  
плотномеров 258  
Поверочная схема 32  
Поверхностное натяжение 19  
Поплавки:  
полностью погруженные 179  
плавающие (частично погруженные) 179  
Поправки к показаниям ареометра:  
на капиллярность 44  
— температуру 45  
Пьезометры 149  
безбалластные 151  
переменной вместимости 154  
постоянной вместимости 149  
поршневые 155  
сильфонные 155  
Сахарометры 39  
Скорость ультразвука 223  
Смачиваемость 21  
Спиртометры:  
металлические 48  
стеклянные 39  
Спирты предельные 54  
Схема поверочная 32  
Температура нормальная 45  
Угол краевой 21  
Удельный вес 10  
Урометры 37

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5

### Часть первая

#### Плотномеры для дискретных измерений

Глава первая. Ареометры частичного погружения . . . . .	25
1-1. Принцип действия и устройство ареометров . . . . .	25
1-2. Основы конструирования ареометров . . . . .	40
1-3. Пользование ареометрами . . . . .	47
1-4. Металлические спиртомеры . . . . .	48
1-5. Основы поверки ареометров . . . . .	57
Глава вторая. Ареометры полного погружения . . . . .	61
Глава третья. Попларково-весовые плотномеры . . . . .	66
3-1. Принцип гидростатического взвешивания . . . . .	66
3-2. Модифицированные весы общего назначения . . . . .	71
3-3. Коромысловые плотномеры . . . . .	78
3-4. Ареометрические весы . . . . .	96
3-5. Пружинные и электромагнитные плотномеры . . . . .	97
3-6. Флотационные плотномеры . . . . .	101
3-7. Градиентные плотномеры . . . . .	117
Глава четвертая. Объемно-весовые плотномеры . . . . .	125
4-1. Пикнометрический метод измерения плотности . . . . .	125
4-2. Пикнометры . . . . .	133
4-3. Дилатометры и пьезометры . . . . .	149
4-4. Объемомеры . . . . .	155
4-5. Ареопикнометры . . . . .	158
4-6. Адсорбционные плотномеры . . . . .	160
Глава пятая. Гидростатические и гидродинамические плотномеры . . . . .	162
5-1. Гидростатические плотномеры . . . . .	162
5-2. Струйные плотномеры . . . . .	166
5-3. Скоростные плотномеры . . . . .	172

### Часть вторая

#### Плотномеры для непрерывных измерений

Глава шестая. Попларково-весовые и попларково-весовые плотномеры . . . . .	179
Глава седьмая. Объемно-весовые плотномеры . . . . .	191

Глава восьмая. Гидростатические плотномеры . . . . .	200
Глава девятая. Гидродинамические плотномеры . . . . .	216
Глава десятая. Ультразвуковые плотномеры . . . . .	222
Глава одиннадцатая. Вибрационные плотномеры . . . . .	234
Глава двенадцатая. Радиоизотопные и вихревые плотномеры . . . . .	253
Приложение 1. Плотность дистиллированной воды при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. (101 325 Па), кг/м <sup>3</sup> . . . . .	259
Приложение 2. Плотность сухого атмосферного воздуха $D_{t, в}$ , кг/м <sup>3</sup> . . . . .	260
Приложение 3 . . . . .	261
Список литературы . . . . .	262
Предметный указатель . . . . .	276

СОЛОМОН СЕМЕНОВИЧ К И В И Л И С

**ПЛОТНОМЕРЫ**

Редактор Э. К. Щепин  
Редактор издательства Л. Д. Никулина  
Оформление художника И. Е. Сайко  
Технический редактор Н. П. Собакина  
Корректор И. А. Володяева  
ИБ № 1320

Сдано в набор 28.01.80 Подписано  
в печать 19.03.80 Т-07106 Формат  
84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub> Бумага типографская № 2  
Гарн. шрифта литературная. Печать  
высокая Усл. печ. л. 14,70 Уч.-изд. л.  
16,21 Тираж 6500 экз. Заказ 519.  
Цена 95 к.

Издательство «Энергия», 113114,  
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союз-  
полиграфпрома при Государственном  
комитете СССР по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли.  
113114, Москва, М-114, Шлюзовая  
наб.. 10