

**Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра физики атмосферы**

---

# **Измерение атмосферного давления**

**Задача спецпрактикума**

**Составил доц. В.И.Захаров**

**Москва  
2005**

## Цель работы

Измерения температуры, давления, влажности воздуха и ряда других параметров производятся в одно и то же время на всех метеорологических станциях земного шара. Это дает возможность составить карту погоды, наблюдающуюся в определенный момент на всей земле, что очень важно для прогнозирования. Для получения адекватного прогноза погоды измерения должны выполняться с достаточно высокой точностью, а показания приборов должны быть приведены к единому международному стандарту.

Данная задача практикума познакомит вас физическими принципами работы и с устройством основных типов ртутных барометров, позволит с их помощью выполнить точные измерения атмосферного давления, а также даст представление о физической сути поправок к показаниям ртутных барометров.

Таким образом, **целью** данной работы является:

- 1. Выполнение измерений атмосферного давления по ртутному барометру с проведением оценки точности измерений.**
- 2. Знакомство с практическим применением барометрической формулы для приведения атмосферного давления к уровню моря.**

Вопросы для самоконтроля приведены в конце описания.

## Введение

Газовая оболочка, окружающая Землю, своим весом оказывает давление на поверхность земли. Если воздух находится в состоянии покоя, то любой его слой находится под давлением, которое равно весу вышележащих слоев воздуха. Это давление уравнивается упругостью воздуха, следовательно, в состоянии покоя давление равно упругости воздуха. В тех случаях, когда в воздухе имеются восходящие потоки, давление на основание воздушного столба будет уменьшаться и, наоборот, при нисходящих потоках – увеличиваться. Оказывается, что при длительном измерении скачки давления за счет нисходящих и восходящих потоков компенсируются, и давление определяется только весом вышележащих слоев воздуха.

Сведения о давлении, также как и сведения о температуре и плотности воздуха на различных высотах от поверхности земли, необходимы для практической деятельности человека. Требуемые точности измерения атмосферного давления являются весьма высокими – погрешность измерения должна находиться в пределах 0,02 - 0,05%. Требования высокой точности обуславливают специфические правила измерения атмосферного давления и правила обращения с барометрами.

В связи с влиянием на атмосферу излучения Солнца и других факторов атмосфера находится в непрерывном движении, проявляющемся, в частности, в изменении атмосферного давления в пространстве и во времени. Атмосферное давление зависит от высоты и широты, имеет как годовой, так и суточный ход. Большие изменения давления связаны с перемещением циклонов и антициклонов. Кроме того, в точке измерения наблюдаются микрофлуктуации атмосферного давления, носящие случайный характер, что требует проведения измерений в течение, по крайней мере, 30 минут. Таким образом, изменение атмосферного давления имеет квазистационарный характер.

Вопросы распределения в атмосфере давления, плотности, температуры решаются на основе уравнения статики атмосферы:

$$-dP = g\rho dz, \quad (1)$$

где  $P$  – атмосферное давление,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\rho$  – плотность воздуха,  $z$  – высота.

В общем случае  $g$  зависит от широты и высоты над уровнем моря. Плотность воздуха  $\rho$  зависит сложным образом и от высоты, и от температуры. Частным простейшим случаем решения уравнения (1) является случай **однородной атмосферы**, получаемый в предположении, что плотность воздуха с высотой не изменяется ( $\rho = \rho_0 = const$ ), тогда

$$P = P_0 - \rho_0 gz \quad (2)$$

Выражение (2) называется барометрической формулой однородной атмосферы. Согласно этой формуле давление в однородной атмосфере падает с высотой по линейному закону. Однородная атмосфера – это грубая модель, описывающая поведение реальной атмосферы на небольших высотах.

Найдем высоту, на которой давление однородной атмосферы упадет до нуля:

$$P_0 - \rho_0 g H = 0,$$

$$H = \frac{P_0}{\rho_0 g}.$$

Так как  $P_0 = \rho_0 R T$ , где  $T$  – температура воздуха в  $^{\circ}\text{K}$  при  $z = 0$ , то

$$H = \frac{RT}{g} = \frac{273 \cdot R}{g} (1 + \alpha t),$$

где  $t$  – температура в  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha = 0,00366 \text{ град}^{-1}$ ,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ,  
 $R = 287 \text{ м}^2 / \text{с}^2 \cdot \text{град}$ .

Отсюда следует, что высота однородной атмосферы при  $t = 0^{\circ}\text{C}$  составляет  $H \approx 8000 \text{ м}$ .

Существуют другие приближения, получаемые при интегрировании уравнения (1) в предположениях: температура  $T = \text{const}$ , градиент температуры  $\frac{\partial T}{\partial z} = -\gamma = \text{const}$  и т.д.

### Единицы измерения атмосферного давления

Единица измерения давления в системе СИ – Паскаль,  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2$ . В системе СГС единицей давления является  $1 \text{ дин/см}^2$ . Эта единица давления в 1903 г. получила название «бар» и до сих пор используется в физике и технике, особенно, в акустике.

В настоящее время в метеорологии принята международная внесистемная единица давления – бар.  $1 \text{ Бар} = 10^5 \text{ Па} = 10^6 \text{ дин/см}^2$ .

Атмосферное давление выражают также в миллиметрах ртутного столба. Соотношение единиц давления мм. рт. ст. с  $\text{дин/см}^2$  и мб следующие:

$$1 \text{ мм рт ст} = \frac{0,1 \text{ см} \cdot \rho_{\text{рт}} g}{1 \text{ см}^2} = 1333,24 \text{ дин/см}^2 = 1,333224 \text{ мб},$$

где  $\rho_{\text{рт}} = 13,5951 \text{ г/см}^3$  – плотность ртути при  $0^{\circ}\text{C}$ , причем допустимые отклонения плотности ртути для барометров не должны превышать  $\pm 0,0001 \text{ г/см}^3$ ;  $g = 980,665 \text{ см/с}^2$  – ускорение силы тяжести на широте  $\varphi = 45^{\circ}$  на уровне моря.

## Общее устройство ртутных барометров

Устройство жидкостных манометров, в частности и ртутных барометров, основано на принципе сообщающихся сосудов. В настоящее время применяются несколько видов ртутных барометров, схематически показанных на Рис.1: а) чашечный, б) сифонный, в) сифонно-чашечный барометры.

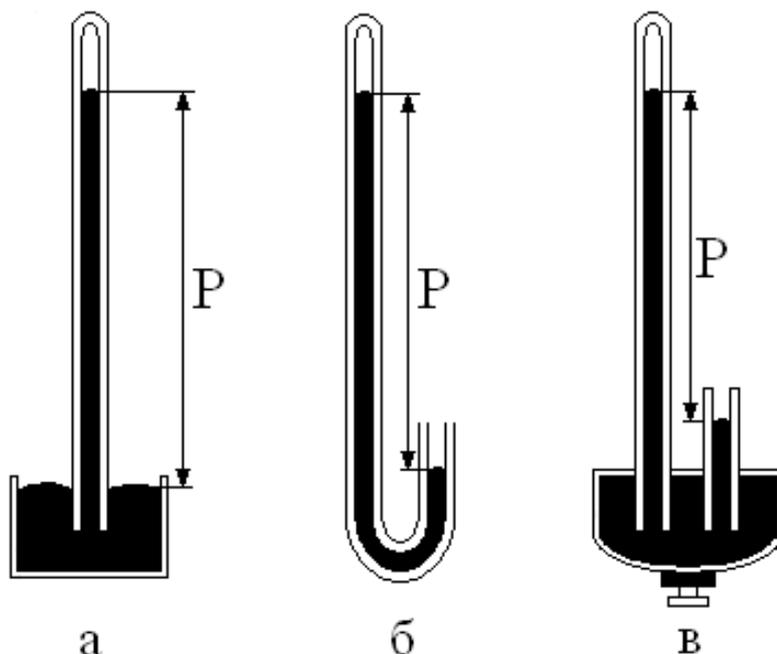


Рис. 1. Схематическое представление ртутных барометров: а – чашечного, б – сифонного, в – сифонно-чашечного.

Далее рассмотрим непосредственно устройство приборов, с которыми Вам предстоит работать при выполнении этой задачи.

Таких приборов два :

*Сифонно-чашечный инспекторский барометр*

и

*Стационарный чашечный барометр.*

Отметим, что этими приборами не исчерпывается все многообразие существующих ныне ртутных барометров. Основные технические принципы построения и функционирования этих приборов сложились 50 – 80 лет назад. Тем не менее, сейчас нет приборов, которые меряют *абсолютные значения атмосферного давления* точнее ртутных барометров, хотя конечно, *изменения давления меряются весьма точно другими методами.*

## Сифонно-чашечный инспекторский барометр

Сифонно-чашечный инспекторский барометр изображен на Рис. 2. Барометр состоит из стеклянных трубок 1 и 14, плотно вставленных в чашку, верхняя часть которой выполнена в виде стального цилиндра 15, а нижняя представляет собой лайковый или кожаный мешок 16.

Чашка перегорожена диафрагмой 20, имеющей отверстие 19, расположенное напротив короткого колена.

Трубка 1 - так называемое короткое колено барометра - оканчивается крановой насадкой 2. Когда кран открыт, ртуть в коротком колене сообщается через отверстие с атмосферным воздухом.

Барометрическая трубка 14 - длинное колено - сверху запаяна, причем при заполнении барометра ртутью принимают все меры к тому, чтобы из пространства над ртутью в барометрической трубке откачивался воздух, так чтобы при комнатной температуре его упругость не превышала нескольких тысячных долей миллибара, что на 1 - 2 порядка, чем точность отсчетов по барометрам рассматриваемого типа.

Разность уровней ртути в трубках, которая создается атмосферным давлением, измеряется с помощью шкалы 11, нанесенной на металлической оправе барометра. Нулевое деление шкалы с точностью до инструментальной поправки совпадает с нижним концом хомутика 13.

При измерениях, поворачивая подъемный винт 18 при открытом кране барометра, приподнимают дно лайкового мешка до тех пор, пока мениск ртути в коротком колене не совпадет с нижним обрезом хомутика 13. Нижняя часть оправы - стальной стакан 17 - имеет отверстие. При отсутствии этого отверстия давление ртути внутри и снаружи стакана 17 выравнивалось бы медленно, в результате чего фирма, а следовательно, и объем лайкового мешка постепенно менялись бы во время производства измерений; соответственно менялись бы уровни ртути в коленах барометра, что затрудняло бы производство отсчетов по барометру.

Если мениск ртути в коротком колене совпадает с нулем шкалы, то для измерения разностей уровней ртути в трубках достаточно заметить по шкале положение мениска ртути в барометрической трубке.

Для измерения высоты расположения мениска ртути в барометрической трубке на ее оправу надета муфта 9, которая при ослабленном стопорном

винте 8 может передвигаться по оправе вверх и вниз. Муфта связана с колодкой 6 микрометрическим кольцом 7, поворачивая которое при закрепленной муфте 9, можно точно совместить нижний срез колодки 6 с мениском ртути. На колодке нанесены деления нониуса: слева миллибаровые, справа миллиметровые. Нижний срез колодки является нулевым делением нониуса. Нониус разделен на 20 частей, что позволяет производить отсчет с точностью до 0,05 мб или до 0,05 мм. При некотором навыке отсчет можно производить с точностью до 0,01 мб или до 0,01 мм.

На высокогорных станциях ртуть даже при самом низком положении винта 18 может оказаться выше хомутика 13. В таких случаях в барометре предусмотрен вспомогательный индекс-указатель, смещенный относительно основного нуля шкалы барометра на 100 мм. Этим запасным индексом является нижний срез хомутика 12, под который подводится ртуть при измерении давления на высокогорных станциях.

Для измерения температуры барометра служит термометр 3. С целью придания механической прочности конструкции в целом оправы трубок в верхней части скреплены между собой дополнительным хомутиком 10 и головкой 5. Подвешивают барометр за кольцо 4 на специальном крюке. Нижняя часть барометра при этом фиксируется установочным винтом внутри установочного кольца.

Барометр устанавливается в стеклянном шкафчике в таком месте, где не происходит быстрых и значительных колебаний температуры. Нельзя устанавливать барометр вблизи печей, отопительных батарей, дверей, открывающихся окон. На барометр не должны падать прямые солнечные лучи.

Погрешность измерений прибора составляет  $\pm 0,06$  мб. Максимальная погрешность после введения всех поправок – не более  $\pm 0,3$  мб.

Инспекторский барометр может применяться в качестве контрольного при сравнении с ним стационарных чашечных барометров.

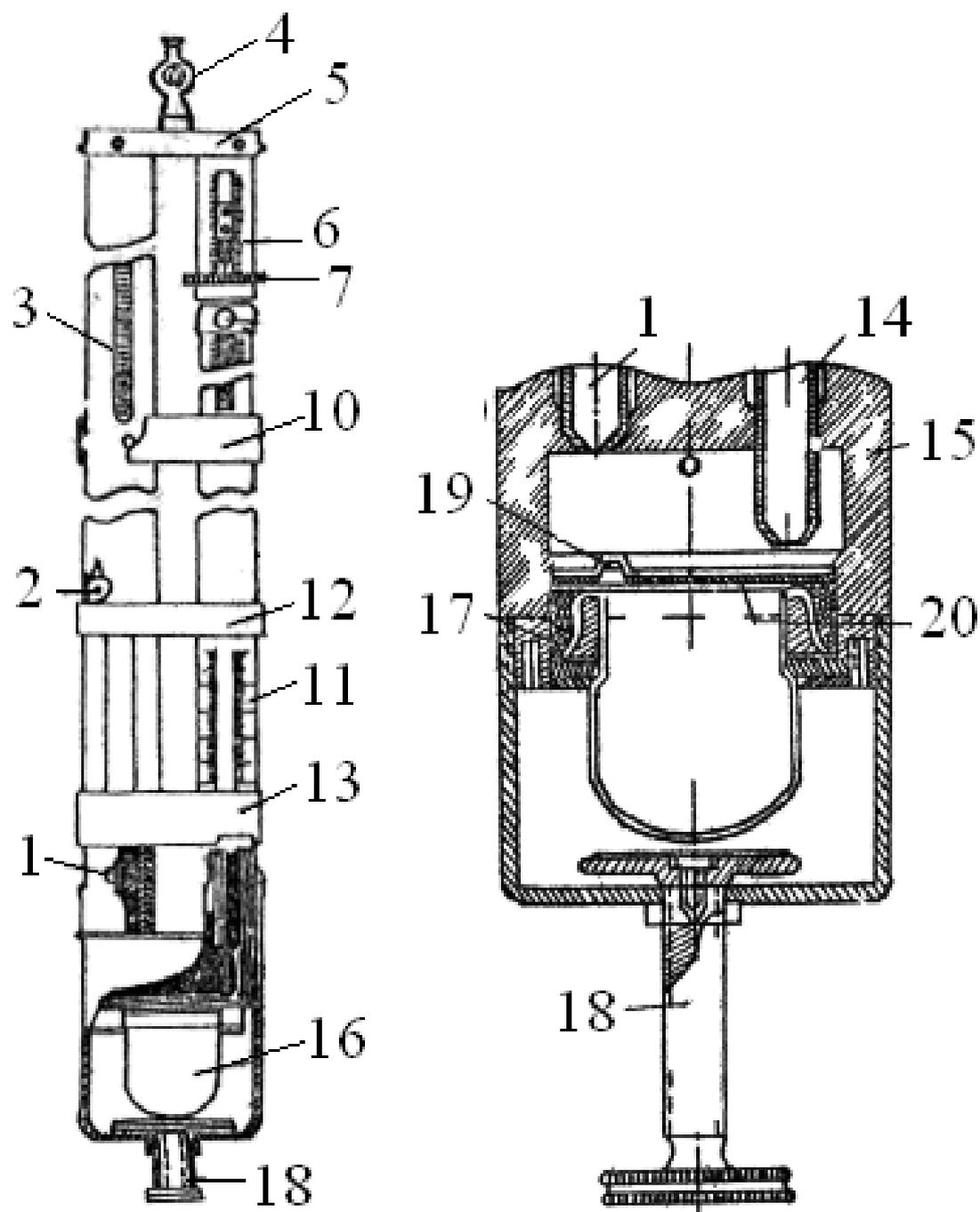


Рис. 2. Сифонно-чашечный инспекторский барометр.

## Стационарный чашечный барометр

Основой конструкции является стеклянная барометрическая трубка 11, вставленная открытым концом 12 в чашку 6, состоящую из трех свинчивающихся друг с другом частей.

Чашка соединяется с атмосферой через отверстие, перекрытое винтом 7. Посередине чашка перегородена массивной диафрагмой 10, имеющей пять радиально расположенных и одно центральное отверстие (Рис. 3).

При давлении, близком к нормальному, ртутью заполнено примерно  $2/3$  внутреннего объема чашки.

Благодаря наличию диафрагмы с отверстиями, волна в ртути, образующаяся в чашке при сотрясании, разбивается на несколько волн, чем значительно уменьшается вероятность того, что ртуть выплеснется из барометрической трубки. Кроме того, при наличии массивной диафрагмы несколько уменьшается объем ртути, необходимый для заполнения барометра.

Измерение высоты столба ртути осуществляется с помощью колодки 2, которая кремальерой 4 может смещаться вверх или вниз по шкале 9, нанесенной на оправе 8. На колодке нанесены деления нониуса. Точность отсчета, которая достигается с помощью нониуса, составляет 0,1 мм или 0,1 мб. Нулевое деление нониуса совпадает с нижним обрезом колодки 2. Шкала и нониус защищены от загрязнения цилиндрическим стеклом 3.

Наводка колодки по мениску ртути и отсчет высоты столба ртути в чашечном барометре осуществляется только в барометрической трубке. Никаких приспособлений для наводки или отсчета ртути в чашке, где расположен нижний уровень ртути, не существует.

Для того, чтобы отсчет по верхнему уровню ртути давал бы возможность измерять высоту столба ртути, необходимо, чтобы нуль шкалы все время совпадал с уровнем ртути в чашке или, во всяком случае, не смещался относительно него.

Однако при измерении давления уровень ртути в чашке, хотя и сравнительно немного, но все-таки смещается, причем изменение уровня ртути в чашке происходит в направлении, противоположном изменению уровня ртути в барометрической трубке. Это смещение учитывают, нанося на шкале барометра деления меньшие, чем их номинальные значения. В

станционных барометрах одно деление шкалы, номинальное значение которого 1 мм, имеет в действительности длину 0,98 мм, так как при соотношении сечений чашки и трубки, которые приняты в станционных барометрах (примерное соотношение сечений обычно составляет 50:1) повышение уровня ртути в трубке на 0,98 мм вызывает понижение уровня ртути в чашке на 0,02 мм, что в сумме соответствует увеличению столба ртути на 1 мм. Таким образом, измеряя смещение ртути в трубке по шкале, длина деления которой равна 0,98 мм, мы измеряем тем самым в миллиметрах изменение столба ртути, уравнивающего атмосферное давление. Описанная выше шкала называется *компенсированной*.

Аналогично построена шкала с миллибаровыми делениями. В последнем случае деления равны 0,735 мм вместо 0,750 мм, т.е. в обоих случаях деления шкалы на 2% меньше номинальных.

Для измерения температуры служит термометр 5, вмонтированный в оправу 8.

Влияние температуры на показания чашечного барометра двоякое. Во-первых, так же как и в сифонно-чашечных барометрах, при изменении температуры изменяется высота столба ртути. Это может быть учтено путем введения поправки на приведение столба ртути к 0<sup>0</sup>C. Во-вторых, при изменении температуры изменяется объем ртути, находящейся в чашке. Это расширение обычно не учитывают, внося его в инструментальную поправку.

Инструментальная поправка чашечного барометра зависит не только от погрешностей изготовления и сборки барометра, но и от количества ртути в нем. Отлив, например, некоторое количество ртути из барометра, мы увеличиваем инструментальную поправку, долив – уменьшаем.

Место установки барометрического шкафчика для чашечного барометра выбирают, исходя из тех же условий, что и для сифонно-чашечных. Подвешивают барометр за кольцо 1. Барометр принимает вертикальное положение под действием силы тяжести.

Чашечный барометр является наиболее простым, но и наименее точным среди рассмотренных типов ртутных барометров. Инструментальная погрешность этих приборов в стационарных условиях составляет  $\pm 0,13$  мб. Максимальная погрешность измерений после введения всех поправок – не более  $\pm 0,5$  мб.

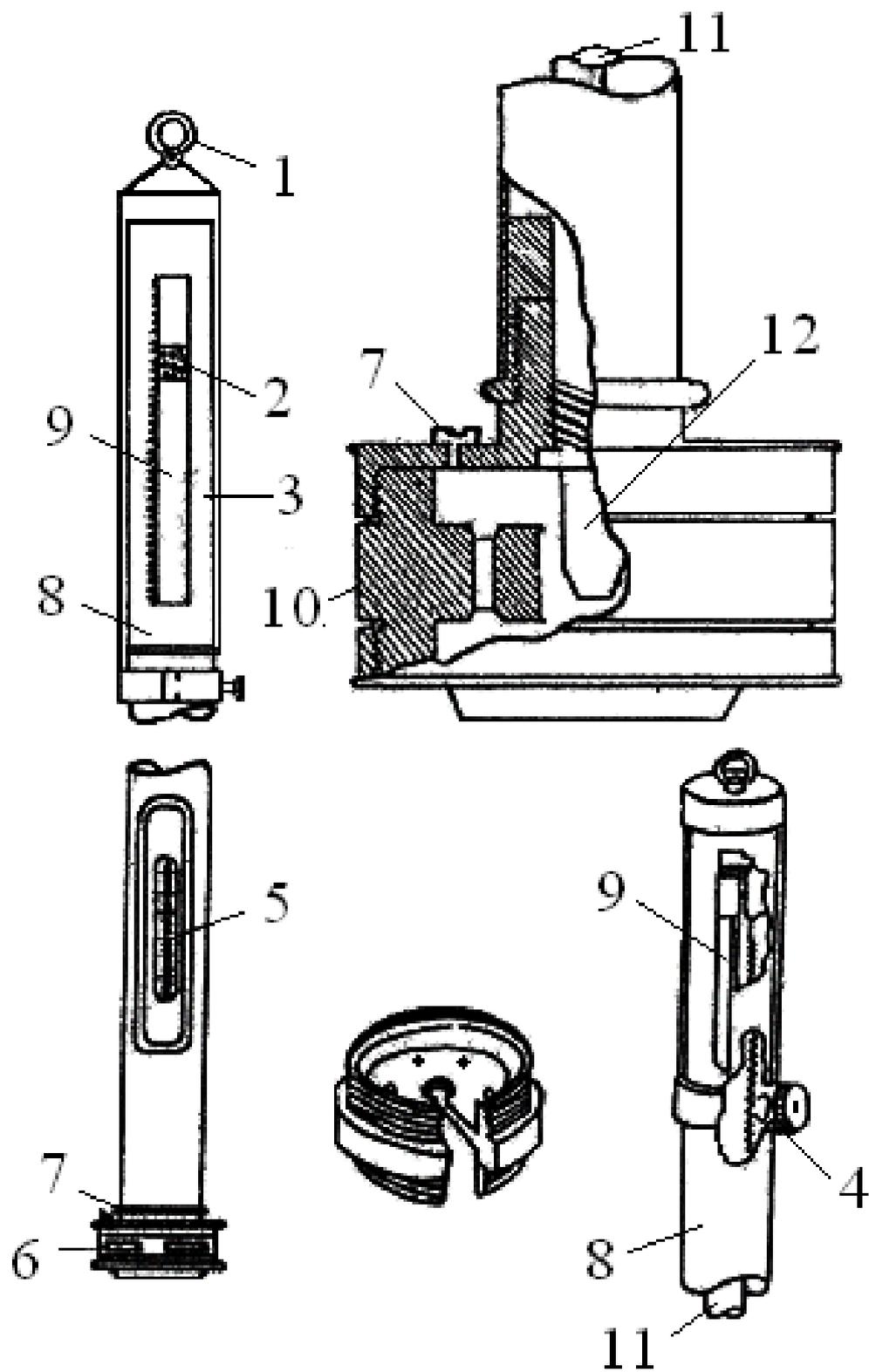


Рис. 3. Стационарный чашечный барометр.

## **Возможные погрешности при измерении давления ртутными барометрами**

Кроме изменения атмосферного давления, на изменение высоты ртутного столба в барометре могут оказать влияние следующие факторы: присутствие газа над ртутью в барометрической трубке, капиллярные явления, происходящие в барометрической трубке, отклонение от вертикали при установке барометра, изменение температуры барометра и изменение силы тяжести.

Рассмотрим, каково влияние этих факторов на показания барометра.

### **Присутствие газа в барометрической трубке над ртутью**

Если в запаянном конце барометрической трубки окажется некоторое количества газа, то упругость этого газа будут вызывать понижение ртутного столба. Упругость газа, находящегося там, не остается постоянной, а меняется в зависимости от температуры и от давления (меняется объем над ртутью).

Таким образом, при одном и том же количестве воздуха в барометрической трубке, погрешность, вызываемая им, будет велика на станциях с высоким средним давлением и значительно меньше на станциях с низким давлением, например, - на высокогорных.

Кроме изменения давления, на упругость воздуха, заключенного в барометрической трубке, влияет изменение температуры. Изменение упругости воздуха в зависимости от изменения температуры можно вычислить по формуле:

$$P_t = P_0(1 + \alpha t),$$

где  $P_t$  - упругость воздуха при температуре  $t$ ,  $P_0$  - упругость воздуха при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha$  - коэффициент расширения воздуха, равный  $1/273^{\circ}$ .

Изменение температуры, например, на  $20^{\circ}$  приведет к изменению поправки на упругость воздуха около 7%, так как величина изменения давления равна  $20/273P_0$ .

Отсутствие воздуха в барометрической и трубке обеспечивается соответствующей технологией производства барометров, а в дальнейшем - надлежащим обращением с барометром, однако, создание достаточно хорошего

вакуума встречает ряд затруднений, так как на поверхности всякого твердого тела при соприкосновении его с газом образуется весьма тонкий слой этого газа (адсорбция газа). По наблюдениям отдельных исследователей  $1\text{ м}^2$  стекла адсорбирует  $0,35\text{ см}^3$  воздуха. Кроме воздуха, на поверхности стекла всегда образуется еще тонкий слой водяного пара.

Удалить слой газа с поверхности тела нелегко. Например, для удаления приставших к стеклу паров воды приходится нагревать стекло до  $500^\circ\text{C}$ , т.е. до температуры, значительно превышающей критическую точку воды.

При изготовлении барометров на внутренней поверхности барометрических трубок, конечно, имеются слои адсорбированного воздуха и водяного пара, которые с течением времени постепенно заполняют пространство над ртутью.

Кроме того, в ртути, как и во всякой жидкости, растворяется воздух. С течением времени под влиянием малого давления воздух будет выделяться в вакуумную часть барометрической трубки.

Избавиться полностью от присутствия воздуха в барометрах крайне затруднительно, а в условиях метеостанции невозможно, поэтому обращаться с барометром следует очень аккуратно.

В чашечном барометре влияние воздуха, находящегося в барометрической трубке, не может быть учтено, тогда как в сифонно-чашечном его можно учесть. С этой целью в контрольном барометре переставляют нижний индекс у короткого колена, тем самым изменяя объем над ртутью в барометрической трубке, а, следовательно, и объем находящегося там воздуха.

Пусть при некотором атмосферном давлении  $P$  и температуре  $t$  высота столба ртути в барометрической трубке равна  $l_1$  и упругостью воздуха  $x_1$  над ртутью в ней.

Изменим объем в барометрической трубке над ртутью, уменьшив его в  $n$  раз, для чего в коротком колене переставим индекс и установим ртуть не на нуль, а выше. В этом случае, если предположить, что температура барометра и внешнее давление остались без изменения, то внешнее давление будет уравновешиваться новым столбом ртути  $l_2$  и новой упругостью воздуха  $x_2$ , заключенного в барометрической трубке.

По закону Бойля-Мариотта при уменьшении объема в  $n$  раз упругость воздуха возрастает в  $n$  раз, и, следовательно,  $x_2 = nx_1$ . Для первой установки

имеем  $P = x_1 + l_1$ , а для второй установки  $P = x_2 + l_2$ . Следовательно,  $x_1 + l_1 = x_2 + l_2$ . Подставив вместо  $x_2$  выражение  $nx_1$ , получим  $x_1 = \frac{l_1 - l_2}{n - 1}$ .

В некоторых случаях в барометре, несмотря на все принятые меры, наблюдается прилипание ртути к стенкам барометрической трубки. Тогда при переворачивании барометра в запаянном конце трубки не происходит отрыва ртутного столба. Приходится постучать по барометру, чтобы ртуть оторвалась, и над ней образовалось вакуумное пространство.

При неосторожном обращении с барометром в его трубку может попасть воздух. Особенно легко впустить воздух в барометрическую трубку при переноске барометра: при этом ртуть, как в чашке, так и в трубке, совершает большие колебания, вследствие чего легко может обнажиться нижний конец барометрической трубки, опущенный в чашку, пузырек воздуха всплывет в ртути и попадет в вакуумную часть барометрической трубки. Чтобы затруднить попадание воздушного пузырька в барометрическую трубку, конец ее, опущенный в чашку, делают слегка оттянутым на конус.



Рис. 5. Воронка-уловитель воздуха.

Кроме того, как это уже указывалось ранее, в некоторых системах барометров устанавливают внутри барометрической трубки стеклянные воронки-уловители воздуха (Рис. 5). Такое приспособление для системы барометров с компенсированной шкалой не применяется, так как, воздух, попавший в барометрическую трубку и задержанный воронкой-уловителем, все же будет влиять на правильность показания барометра. Между тем, присутствие воронки в барометрической трубке лишает возможности удалять воздух из барометра при инспекции метеорологических станций.

Чтобы предохранить барометр от попадания в него воздуха, его всегда переносят чашкой вверх: при таком положении нет опасности, что воздух проникнет в трубку.

## Влияние ртутных паров, находящихся в барометрической трубке

Если даже и удастся хорошо удалить воздух из барометра, то все же в вакуумной части барометрической трубки всегда находятся насыщенные пары ртути, которые постоянно оказывают некоторое давление на ртутный столб в барометрической трубке и уменьшают его. Величина этого давления невелика, и при измерениях давления с точностью до десятых долей миллиметра им можно пренебречь. Действительно, упругость паров ртути при температурах в пределах от  $0^{\circ}$  до  $50^{\circ}$  имеет величины, представленные в Таблице 1.

**Таблица 1. Упругость паров ртути при различных температурах**

Температура, $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50
Давление, мм. рт. ст.	0,0002	0,0005	0,0013	0,0030	0,0065	0,0134

Так как пары ртути являются насыщенными, то определенной температуре всегда будет соответствовать определенная упругость и, следовательно, всегда может быть принято во внимание их действие.

Влияние упругости паров ртути на величину барометрического столба учитывают при наблюдениях по нормальному барометру, где отсчет давления производится с точностью до тысячных долей миллиметра.

## Капиллярные явления, происходящие в барометрической трубке

Силы поверхностного натяжения жидкости вызывают нормальное или молекулярное давление, направленное внутрь жидкости, величина молекулярного давления зависит от рода жидкости, а также и от формы поверхности. По Лапласу величина молекулярного давления на криволинейную поверхность выражается следующей формулой:

$$P_{\text{мол}} = K + \sigma \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right),$$

где  $K$  - молекулярное давление при горизонтальной поверхности,  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения,

$R$  и  $R_l$  - радиусы кривизны поверхности жидкости, взятые в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Второй член формулы  $\sigma \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_l} \right)$  выражает избыток или недостаток избыток молекулярного давления на криволинейную поверхность по отношению к молекулярному давлению  $K$  на горизонтальную поверхность. Избыток или недостаток давления получается в зависимости от формы мениска жидкости. Если мениск выпуклый, то указанный член положителен и выражает избыток давления. В случае же вогнутого мениска этот член отрицателен и выражает недостаток молекулярного давления.

Так как ртуть не смачивает стекло и радиус барометрических трубок сравнительно невелик, то поверхность ртути в барометрических трубках получается выпуклой. Поэтому в барометрической трубке создается молекулярное давление, большее, чем при горизонтальной поверхности ртути. При некоторых условиях избыток молекулярного давления может вызывать понижение ртутного столба в барометрической трубке.

Возьмем два сифонных барометра – 1 и 2 (Рис. 6). При одинаковом атмосферном давлении разность уровней в коротком и длинном коленах в барометре 1 будет меньше, чем в барометре 2. Действительно, в барометре 1 в длинном колене молекулярное давление будет больше молекулярного давления в его коротком колене (в длинном колене мениск более выпуклый), избыток давления заставит столб ртути в коротком колене несколько понизиться.

В барометре 2 молекулярное давление в длинном колене равно молекулярному давлению в коротком колене, так как кривизна у обоих менисков одинакова, молекулярные давления в коротком и длинном коленах направлены навстречу друг другу, и ввиду того, что жидкость можно считать

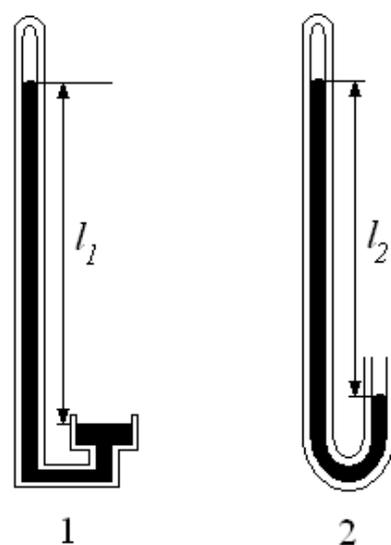


Рис. 6. Различия в показаниях чашечного и сифонного барометров.

несжимаемой, то никакого снижения в барометрическом столбе ртути не будет.

Таким образом, величина снижения ртутного столба в барометре под действием капиллярных сил зависит от разности кривизны менисков в длинном и коротком коленах барометра.

В чашечном барометре молекулярное давление в трубке больше, чем в широкой чашке, так как кривизна поверхности ртути в трубке больше, чем в чашке. Вследствие этого в чашечном барометре будет вызываться снижение высоты ртутного столба под влиянием избытка молекулярного давления, существующего в трубке. Избыток этого давления может быть вычислен по формуле:

$$\Delta = \frac{2\sigma}{R},$$

где  $\Delta$  - избыток молекулярного давления,  $\sigma$  - поверхностное натяжение ртути,  $R$  - радиус кривизны мениска ртути.

Снижение показаний в чашечном барометре входит в инструментальную поправку, получаемую при сравнении чашечного барометра с нормальным.

Величина радиуса кривизны мениска ртути в барометрической трубке чашечного барометра не остается всегда постоянной, а меняется в зависимости от хода давления. Если давление перед отсчетом повышалось, то мениск будет иметь большую кривизну, чем, если бы оно понижалось.

Поэтому величина избытка молекулярного давления в барометрической трубке не будет оставаться постоянной, а, следовательно, и величина снижения ртутного столба также будет меняться. Чтобы избежать переменного действия избытка молекулярного давления, при отсчетах по чашечному барометру рекомендуется делать легкое постукивание по барометрической трубке с той целью, чтобы по возможности создавать всегда одну и ту же кривизну мениска ртути в трубке и тем самым одно и то же действие избытка молекулярного давления.

В сифонно-чашечных барометрах действие капиллярных сил сказывается значительно меньше. Действительно, так как длинное и короткое колена в барометрической трубке изготавливаются из одного куска стеклянной трубки, следовательно, одного диаметра, то при подводке ртути

для отсчета условия образования кривизны мениска как в длинной, так и в короткой трубках почти одинаковы. Поэтому, если под действием избытка молекулярного давления, направленного внутрь жидкости, в длинном колене барометра ртуть должна опуститься, то под действием избытка молекулярного давления в коротком колене должна подняться. При условии одинаковой кривизны менисков ртути как в длинном, так и в коротком колене, эти давления должны уравновеситься, а так как жидкость можно считать несжимаемой, то снижение столба ртути не произойдет.

Некоторая разница в кривизне длинного и короткого колен барометра все же может получиться, потому что ртуть, находящаяся в коротком колене, благодаря присутствию в нем воздуха может окисляться, и ввиду этого условия для смачивания стекла ртутью будут несколько другие, чем в длинном колене.

Величина снижения ртутного столба под действием капиллярных сил для трубок различных диаметров приведена в Таблице 2.

**Таблица 2. Снижение ртутного столба, мм под действием капиллярных сил в зависимости от диаметра трубки.**

Диаметр трубки, мм	Высота мениска, мм					
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
5	0,65	0,86	1,19	1,45	1,80	-
6	0,41	0,56	0,78	0,98	1,21	1,43
7	0,28	0,40	0,53	0,67	0,82	0,97
8	0,2	0,29	0,38	0,46	0,56	0,65
9	0,15	0,21	0,28	0,33	0,40	0,46
10	-	0,15	0,20	0,25	0,29	0,33
11	-	0,10	0,14	0,18	0,21	0,24
12	-	0,07	0,10	0,13	0,15	0,18

Влияние капиллярных эффектов входит в инструментальную поправку сифонно-чашечных барометров.

Чтобы уменьшить действие капиллярных сил, необходимо радиус барометрической трубки делать по возможности большим, так как при этом радиус кривизны мениска также растет, а избыток давления уменьшается. Как показывают, вычисления, при радиусе трубки равном 24 мм, избыток

молекулярного давления становятся очень мал, и потому величина снижения ртути в барометрической трубке не будет заметной.

### **Влияние наклона барометра на его показания**

Шкала, по которой отсчитывается длина барометрического столба, связана с барометрической трубкой. Поэтому при наклоне барометра отсчет получается большим, чем при его вертикальном положении.

Отсчеты длины барометрического столба, сделанные при вертикальном положении барометра  $l$  и при наклоне его на угол  $\alpha$ , т.е. в положении  $l_\alpha$ , связывает следующая формула:  $l = l_\alpha \cos \alpha$ . Вводя замену  $\cos \alpha = 1 - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}$

будем иметь  $l = l_\alpha \left( 1 - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right)$  или  $l_\alpha - l = 2l \left( \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right)$ .

Если требовать, чтобы разность отсчетов барометра в вертикальном положении и при его наклоне, т.е. не превышала 0,01 мм, то, следовательно, должно выполняться неравенство  $l_\alpha - l \leq 0,01 \text{ мм}$ . Если  $l_\alpha = 760 \text{ мм}$ , то угол  $\alpha$  не должен быть больше  $17'38''$ .

Разница в отсчетах барометра в 0,1 мм получается при угле  $\alpha = 55'46''$ , т.е. при отклонении чашки барометра от отвеса на 12,3 мм.

Из приведенных цифр видно, что установка барометра по отвесу должна производиться очень точно, чтобы не допустить ошибки  $\geq 0,1$  мм.

### **Приведение показаний ртутных барометров к условиям нормального атмосферного давления**

В жидкостном барометре столб жидкости высотой  $l$  уравнивает давление атмосферного воздуха. Давление воздуха в единицах силы на единицу площади определяется формулой

$$P = \rho g l, \quad (3)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости в барометре,  $g$  - ускорение свободного падения.

На основании формулы (3) для измерения атмосферного давления ртутным барометром необходимо отсчитывать высоту  $l$  столба ртути в барометре. Она может изменяться в зависимости от температуры воздуха в

точке измерения, высоты над уровнем моря, географической широты. Поэтому для приведения показаний барометров к общепринятым, стандартным условиям к отсчету высоты ртути в барометре необходимо вводить поправки на температуру, высоту и широту.

В качестве нормального принято считать атмосферное давление 760 мм. рт. ст. при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  на широте  $45^{\circ}$  на уровне моря. Результаты измерений атмосферного давления обычно приводят к условиям нормального атмосферного давления.

**Поправки к показаниям ртутных барометров  
для приведения давления к  $0^{\circ}\text{C}$  и нормальному ускорению  
силы тяжести**

Для определения вида поправок к отсчету высоты столба ртути  $l$  в барометре выполним преобразования формулы (3). Перепишем ее в виде:

$$P = l\rho_0g_n \cdot \frac{\rho g}{\rho_0g_n}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  - плотность ртути при  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $g_n$  - нормальное ускорение силы тяжести (на уровне моря, на широте  $45^{\circ}$ ).

Отношение  $\rho/\rho_0$  в формуле (4) зависит только от температуры ртути, отношение  $g/g_n$  - от широты точки измерения и его высоты над уровнем моря. Эти зависимости могут быть представлены в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho/\rho_0 = 1 - \alpha_{pm} \cdot t \\ g/g_n = (1 - \beta \cos 2\varphi) \cdot (1 - \gamma z) \\ \beta = \frac{g_{90^{\circ}} - g_{0^{\circ}}}{g_{90^{\circ}} + g_{0^{\circ}}} = 0,00265 \\ \gamma = l/R = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1} \end{array} \right. \quad (5)$$

В системе выражений (5) интересующие нас поправки  $\alpha_{pm} \cdot t$ ,  $\beta \cos 2\varphi$ ,  $\gamma z$  являются малыми по сравнению с единицей. Подставляя (5) в (4) и пренебрегая произведением этих величин, получим

$$P = l\rho_0g_n(1 - \alpha_{pm}t - \beta \cos 2\varphi - \gamma z). \quad (6)$$

Для приведения атмосферного давления к единицам мм. рт. ст. при  $0^{\circ}\text{C}$  и нормальном ускорении силы тяжести правую часть (6) необходимо разделить на вес такой единицы.

Столб ртути высотой 1 мм и сечением  $1\text{ см}^2$  при  $0^{\circ}\text{C}$  и нормальном ускорении силы тяжести весит  $0,1\rho_0g_n$ . Поэтому, разделив правую часть (6) на  $0,1\rho_0g_n$ , получим

$$P = 10l\rho_0g_n(1 - \alpha_{pm}t - \beta \cos 2\varphi - \gamma z), [l] - \text{см}, \quad (7)$$

или  $P = l - l\alpha_{pm}t - l\beta \cos 2\varphi - l\gamma z$ , если высоту ртути  $l$  измерять в мм.

Таким образом, для определения атмосферного давления в единицах мм. рт. ст. при  $0^{\circ}\text{C}$  и нормальном ускорении силы тяжести мы должны к отсчету высоты столба ртути  $l$  внести две поправки:

а) температурную поправку (приведение столба ртути к  $0^{\circ}\text{C}$ )  $\Delta P_t = -\alpha t$ ,  $\alpha = 0,000164 \text{ град}^{-1}$ ,

б) поправку на силу тяжести, включающую приведение столба ртути к ускорению силы тяжести на широте  $\varphi = 45^{\circ}$   $\Delta P_{\varphi} = -l\beta 2 \cos \varphi$  и к ускорению силы тяжести на уровне моря  $\Delta P_z = -\gamma z$ .

При практическом применении формул (7) и (8) необходимо учесть, что при изменении температуры в результате теплового расширения шкалы меняется длина делений, нанесенных на ней. Чтобы не учитывать это явление отдельно, в формулах, предназначенных для расчета поправок, в качестве коэффициента  $\alpha$  принимают разность между коэффициентами ртути ( $\alpha_{pm} = 0,000181 \text{ град}^{-1}$ ) и латуни ( $\alpha_{лат} = 0,0000181 \text{ град}^{-1}$ ). Поэтому величина  $\alpha$  в формулах (7) и (8) должна быть равна:  $\alpha = 0,000163 \text{ град}^{-1}$ .

Выше было получено выражение (7), определяющее результаты измерения атмосферного давления, выраженного в мм. рт. ст. Если в качестве единицы давления выбран мб, то правую часть (6) необходимо разделить на  $10^3$ :

$$P = l \frac{\rho_0 g_n}{10^3} (1 - \alpha_{pm} t - \beta \cos 2\varphi - \gamma z). \quad (8)$$

Отсюда следует, что на барометрах со шкалой в 1 мб наносят деления, равные  $\frac{10^3}{\rho_0 g_n} = \frac{10^3}{13,5951 \cdot 980,665} = 0,075 \text{ см}$ .

Атмосферное давление по ртутному барометру определяют по следующему правилу:

$$P = P_0 + \Delta P_\phi + \Delta P_z + \Delta P_t, \quad (9)$$

где  $P_0$  – отсчет по барометру.

### Приведение давления к уровню моря

Приведение давления к уровню моря не следует путать с введением «высотной» поправки к показанию барометра (связанной с изменением силы тяжести в зависимости от расстояния до центра Земли).

Изменение атмосферного давления с высотой описывается барометрической формулой:

$$P_2 = P_1 \exp\left(-\int_{z_1}^{z_2} \frac{g dz}{RT}\right), \quad (10)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – значения давления на высотах  $z_1$  и  $z_2$  соответственно

В этой формуле можно пренебречь изменением ускорения силы тяжести с высотой и широтой, а воздух можно считать сухим. Таким образом, формула (10) может быть представлена в виде:

$$P_2 = P_1 \exp\left(-\frac{g}{R_c} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{T}\right). \quad (11)$$

Выражение  $T_m = \frac{1}{\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{T(z)}}$  называют средней барометрической

температурой. На практике нередко отождествляют  $T_m$  со средней арифметической температурой, т.е. полагают  $T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} = T_{cp}$ , где  $T_1$  – температура на высоте  $z_1$ , а  $T_2$  – температура на высоте  $z_2$ .

Среднюю температуру удобно представить в виде:

$$T_{cp} = 273,15(1 + \alpha t_{cp}),$$

где  $\alpha = 1/273,15 = 0,00365$ ,  $t_{cp}$  – средняя температура в  $^{\circ}\text{C}$ .

При этих предположениях получаем:

$$P_2 = P_1 \exp\left(\frac{-g(z_2 - z_1)}{R_c \cdot 273,15(1 + \alpha t_{cp})}\right), \quad (12)$$

Соотношением (12) можно пользоваться в случаях, когда разность высот не превышает 500 м.

Приведение давления к уровню моря можно производить, пользуясь понятием барической ступени. Барической ступенью называют разность высот между двумя точками, если разность давления между ними составляет 1 мб или мм. рт. ст.

Формулу для нахождения барической ступени можно получить следующим путем.

Пусть при изменении высоты на  $dz$  давление падает на  $dP$ . Тогда для того, чтобы давление упало на 1 мб, необходимо подняться на высоту

$$h = \frac{dz}{-dP} \text{ или с учетом (1):}$$

$$h = \frac{1}{\rho g}. \quad (13)$$

Формула (13) показывает, что барическая ступень зависит только от плотности воздуха (зависимостью  $g$  от высоты здесь можно пренебречь).

Полагая  $\rho = \frac{P}{RT}$ , и выражая абсолютную температуру через температуру по шкале Цельсия:  $T = 273(1 + \alpha t_{cp})$  из (13) получим:

$$h = \frac{H}{P}(1 + \alpha t_{cp}), \quad (14)$$

где  $H \cong 8000\text{м}$  - высота однородной атмосферы.

При грубых оценках барическую ступень удобно считать равной 10 м/мб. Приводя давление к уровню моря, используют более точное значение барической ступени. В этом случае вычисления производят в следующем порядке.

1. Определяют температуру воздуха  $t_1$  на уровне моря, исходя из того, что с уменьшением высоты на 100 м температура поднимается на  $0,6^{\circ}\text{C}$  (градиент температуры считается адиабатическим):  $t_1 = t_2 + 0,006z$ ,

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = t_2 + 0,003z, \quad (15)$$

где  $t_2$  – температура, измеренная в точке наблюдения,  $z$  – высота над уровнем моря в метрах.

2. По среднему значению температуры столба воздуха и давлению, измеренному в точке наблюдения, находят приближенное значение барической ступени  $h^0$  по формуле  $h^0 = \frac{H}{P}(1 + \alpha t_{cp})$ .

3. Приближенно находят давление на уровне моря:

$$P_1 = P_2 + \frac{z}{h^0}. \quad (16)$$

4. По среднему значению давления  $P_{cp} = \frac{P_1 + P_2}{2}$  и среднему значению температуры столба воздуха находят окончательное значение барической ступени:

$$h = \frac{H}{P_{cp}}(1 + \alpha t_{cp}). \quad (17)$$

5. Вычисляют окончательное давление на уровне моря по формуле

$$P_1 = P_2 + \frac{z}{h}. \quad (18)$$

## Выполнение задачи

### Порядок выполнения измерений

1. Определяют температуру воздуха по термометру с точностью до  $0,1^{\circ}\text{C}$ .
2. Измерения атмосферного давления производятся по обоим барометрам. Отсчет по чашечному барометру производится с помощью лупы с точностью до  $0,05$  мб. Всего производят 10-12 отсчетов с интервалом 4-5 минут. После каждого отсчета нониус опускают на 5 мб.

### Упражнения по обработке данных

1. Определить среднее значение  $\bar{P}$  и ошибку измерения  $\sigma_{\bar{P}}$  давления. Окончательный результат измерений представить в виде  $P = \bar{P} \pm t_s \sigma_{\bar{P}}$ , где  $t_s$  – коэффициент Стьюдента (значения представлены в Таблице 3).

Таблица 3. Значения коэффициента Стьюдента

Число измерений	Доверительная вероятность*				
	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7
3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9
4	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8
5	1,5	2,1	2,8	3,8	4,6
6	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0
7	1,4	1,9	2,5	3,1	3,7
8	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5
9	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4
10	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3
11	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6

\*в задаче рекомендуется использовать значение доверительной вероятности – 0,9.

2. Определить поправки к показаниям ртутных барометров. Представить результат измерения давления с учетом поправок в виде  $P = P_o + \Delta P_{\varphi} + \Delta P_z + \Delta P_t$ . Считать высоту точки наблюдения над уровнем моря

равной 222 м; широта Москвы -  $56^0$ . Значения коэффициентов:  $\beta = 0,00265$ ,  $\gamma = 2 \cdot 10^{-7}$ .

3. Привести давление к уровню моря двумя способами: по формуле (12) и пользуясь понятием барической ступени.

4. Оценить ошибку определения давления на уровне моря  $\sigma P_1$  по формуле (12), исходя из ошибки измерения давления  $\sigma P_2$ .

5. Оценить точность приведения с помощью барической ступени путем сравнения результатов со значениями, полученными по формуле (12).

## Литература

1. Хргиан А.Х. Физика атмосферы.
2. Карпуша В.Е., Чернов В.С. Измерение атмосферного давления.
3. Зайдель. Элементарная оценка ошибок измерений.

## Контрольные вопросы.

- Сформулируйте приближение изотермической атмосферы.
- Что такое однородная атмосфера?
- Приведите основные типы барометрических формул.
- Как меняется ускорение свободного падения при изменении высоты и широты точки наблюдения?
- Что такое “компенсированная” измерительная шкала?
- Какова физическая сущность поправок на температуру, высоту и широту места измерения? Каков знак поправок? Влияет ли изменение температуры на измерительную шкалу? Если да, то как?
- Роль капиллярных эффектов и давления паров ртути в работе барометра.
- Как определить разность высот между двумя точками по измеренному на этих высотах давлению?
- Физический смысл барической ступени и границы ее применимости.
- Что изменится в работе барометра и при определении поправок, если вместо ртути использовать другую жидкость, например, воду?