

## Практическое занятие 6

### 1. Атмосферное давление и его измерение

*Атмосферное давление* – это давление, оказываемое атмосферой на все находящиеся в ней предметы и на земную поверхность. В метеорологии для измерения атмосферного давления используют единицу гектопаскаль (гПа).  $1 \text{ гПа} = 100 \text{ Па}$ . Во многих странах по традиции применяют внесистемную единицу измерения давления – миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.).

Многие процессы в атмосфере происходят настолько быстро, что теплообмен между воздушными массами незначителен и протекание их можно представлять по адиабатическому закону:

$$pV^k = \text{const}, \quad (1)$$

где  $k = 1,4$  – показатель степени (показатель адиабаты).

В связи с этим внутренняя энергия какой-либо воздушной массы изменяется не за счет притока или оттока тепла, а за счет работы сжатия или расширения. При сжатии давление и температура повышаются, а при расширении – наоборот. При подъеме воздушных масс, который часто встречается в тропосфере, воздух, расширяясь, охлаждается и давление его падает. Сжатие воздуха происходит обычно при его опускании, при этом его температура и давление повышаются.

Так как газы подчиняются тем же законам, что и жидкости, то *основное уравнение статики атмосферы* получим, продифференцировав основное уравнение гидростатики (2.3):

$$p + \rho gz = \text{const};$$

$$dp + \rho g dz = 0,$$

откуда

$$dp = - \rho g dz. \quad (2)$$

Из этого уравнения видно, что при положительном приросте высоты атмосферное давление падает. Уменьшение давления, приходящееся на единицу высоты

$$dp / dz = - \rho g, \quad (3)$$

называется вертикальным барическим градиентом.

Подставив в формулу (2) выражение плотности сухого воздуха из уравнения газового состояния, получим

$$dp = -\frac{pg}{R_{св} \cdot T} dz,$$

откуда

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R_{св} \cdot T} dz. \quad (4)$$

Проинтегрируем уравнение (18.4):

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = -\frac{g}{R_{св} \cdot T} \int_{z_1}^{z_2} dz;$$

$$\ln p_2 - \ln p_1 = -\frac{g}{R_{св} \cdot T} (z_2 - z_1)$$

или

$$p_2 = p_1 e^{\frac{-g(z_2 - z_1)}{R_{св} T}} \quad (5)$$

Полученное уравнение (18.5) в метеорологии называют *барометрической формулой*. Она дает приблизительное решение ввиду принятых некоторых условностей (постоянство температуры  $T$  на разных уровнях и пр.).

Основные метеорологические задачи, которые решаются с помощью барометрической формулы, приведены ниже.

1. Приведение давления от одного уровня высоты к другому. Для этого нужно знать давление на одном каком-нибудь уровне, разность высот и среднюю температуру  $T_{ср}$  слоя воздуха, заключенного между этими отметками высоты. Такую задачу решают весьма часто на метеостанциях при приведении показаний измеренного давления к отметке уровня океана. Это дает возможность объективно выявлять в пространстве области повышенного и пониженного давления и реально прогнозировать погоду.

2. Проведение барометрического нивелирования для нахождения превышения одного уровня над другим при известных величинах давления на обоих уровнях и средней температуры слоя воздуха между ними. Обозначив  $z_2 - z_1 = H$  и имея ввиду, что  $R_{св} = 287,05 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$ , путем алгебраических преобразований формулу (18.5) можно привести к следующему виду:

$$H = -67,4 T_{ср} \lg(p_2 / p_1). \quad (6)$$

3. Определение средней температуры слоя воздуха между двумя известными уровнями по известным давлениям на этих уровнях. Величина  $T_{ср}$  легко определяется из формулы (18.6).

Высота, на которую нужно подняться или опуститься, чтобы давление изменилось на 1 гПа, называется *барической ступенью* (м/гПа). Ее можно вычислить по упрощенной формуле Бабинэ:

$$h_{B1} = 80000(1 + \alpha t_1)/p_1, \quad (7)$$

где  $t_1$  и  $p_1$  – соответственно температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) и давление воздуха (гПа) в точке, для которой вычисляется барическая ступень;

$\alpha$  – объемный коэффициент теплового расширения воздуха ( $\alpha = 0,00366^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

*Горизонтальным барическим градиентом* (ГБГ) называют изменение давления воздуха вдоль горизонтали, направленной перпендикулярно к изобарам от высокого давления к низкому, приходящееся на расстояние 100 км:

$$\text{ГБГ} = 100 \Delta p / \Delta \ell, \quad (8)$$

где  $\Delta p$  – изменение давления, гПа;

$\Delta \ell$  – расстояние по горизонтали (км), на котором давление изменялось на величину  $\Delta p$ .

**Приборы для измерения атмосферного давления.** Рассмотрим конструкции простейших приборов для измерения атмосферного давления, которые можно применить в стационарных или полевых условиях без необходимости электрического питания. Наибольшее распространение получили ртутные барометры и барометры-анероиды, а для непрерывной регистрации изменения давления – барографы.

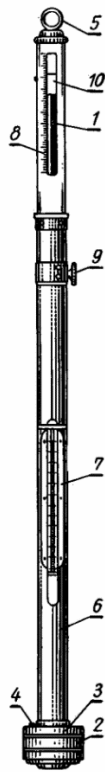


Рис. 1. Ртутный чашечный барометр:

- 1 – трубка; 2 – чашка;
- 3 – отверстие;
- 4 – винт; 5 – кольцо; 6 – оправа;
- 7 – термометр; 8 – шкала; 9 – кремальера;
- 10 – нониус

Стационарный чашечный барометр (рис. 18.1) состоит из двух основных частей: стеклянной трубки 1 и пластмассовой чашки 2, заполненной ртутью.

Стеклянная трубка опущена открытым концом в чашку. Верхний конец трубки запаян. Чтобы воздух не попал в трубку, ее перед опусканием в чашку наполняют ртутью доверху. Чашка состоит из трех свинчивающихся частей. В верхней части 3, помимо отверстия для стеклянной трубки, имеется еще маленькое отверстие для сообщения ртути, находящейся в чашке, с атмосферным воздухом. Для предохранения ртути от загрязнения это отверстие закрывается винтом 4 с кожаной шайбой. В средней части чашки имеется диафрагма с круглыми отверстиями. Диафрагма, занимая некоторый объем, дает возможность наливать в чашку меньше ртути, а также предохраняет ртуть от сильных колебаний и от попадания воздуха в стеклянную трубку при переноске прибора. При сборке прибора стеклянную трубку и чашку заполняют дистиллированной ртутью.

Стеклянная трубка окружена латунной защитной оправой 6, на которой имеются приспособления для отсчетов. В нижней части оправы укреплен термометр 7 для отсчета температуры прибора. В верхней части оправы имеется сквозная прорезь, позволяющая видеть мениск ртутного столба в стеклянной трубке. С левой стороны нанесена шкала 8 с пределами измерений от 680 до 1110 гПа. Вдоль стеклянной трубки с помощью кремальеры 9 перемещается

кольцо с укрепленным на нем нониусом 10, который служит индексом для наводки на мениск ртутного столба и для отсчета десятых долей. Десять делений нониуса равны 9 делениям основной шкалы. В верхней части оправы имеется кольцо 5 для подвешивания барометра.

При отсчетах давления нониус подводят сверху до момента, пока не произойдет касание его нижнего среза верхней части мениска ртути в трубке. Отсчеты показаний барометра и термометра делают с точностью до 0,1 гПа и 0,1°С. Целые единицы (гПа) отсчитывают по нижнему обрезу нониуса, а десятые – по нониусу. Деление нониуса, совпадающее с делением основной шкалы, показывает число десятых долей шкалы.

Столб ртути барометра высотой  $h_{рт}$  уравнивается атмосферным давлением  $p_a$ , которое воздействует на поверхность ртути в чашке барометра и определяется по формуле

$$p_a = \rho g h_{рт}. \quad (9)$$

Величины  $p$  и  $g$  характеризуются изменчивостью. Они зависят от температуры, широты и высоты места. Поэтому их необходимо привести к нормальным (стандартным) условиям путем введения соответствующих поправок, указанных в сертификате барометра.

*Барометр-анероид.* Он относится к деформационным барометрам, основанным на зависимости упругой деформации приемника под воздействием атмосферного давления. Приемником, который воспринимает изменение атмосферного давления, служит анероидная коробка 1, состоящая из двух спаянных между собой гофрированных мембран (рис.2).

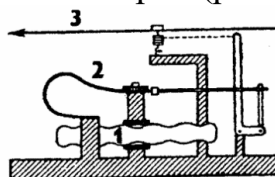


Рис.2. Схема барометра-анероида

Воздух из коробки откачен. Наружное атмосферное давление направлено на сжатие коробки, но пружина 2 уравнивает стенки коробки в растянутом положении. В результате этого крышка коробки способна к деформациям в зависимости от изменения атмосферного давления. Колебания крышки коробки усиливаются специальной системой подвижных рычагов и передаются на стрелку 3, которая перемещается вдоль шкалы с делениями. К шкале анероида прикреплен термометр для измерения температуры прибора. Механизм анероида помещается в пластмассовый кожух.

Анероид устанавливают в горизонтальное положение. При наблюдениях по анероиду вначале отсчитывают температуру по термометру при анероиде с точностью до  $0,1^\circ$ . После этого, слегка постучав по стеклу анероида для преодоления трения в передающей части, отсчитывают положение стрелки относительно шкалы с точностью до  $0,1$  единиц измерения.

*Барограф* применяется для непрерывной регистрации изменений атмосферного давления. Он состоит из трех частей: приемной 1; передающей 2; регистрирующей 3 (рис. 3). Приемной частью, которая реагирует на изменение атмосферного давления, является несколько анероидных коробок, которые соединены вместе. Воздух из коробок откачен, чтобы коробки не сжимались под воздействием атмосферного давления, в середине каждой коробки содержится пружина в виде рессоры. При увеличении атмосферного давления коробки сжимаются, а при уменьшении – растягиваются. Чувствительность анероидных коробок зависит от изменений температуры. Для исключения влияния температуры на показания барографа используется биметаллический термокомпенсатор.

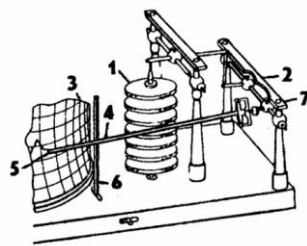


Рис.3. Барограф: 1 – anerоидные коробки; 2 – рычаг; 3 – барабан; 4 – стрелка; 5 – перо; 6 – зажим; 7 – кнопка

Колебания anerоидных коробок, обусловленные изменением атмосферного давления, усиливаются передаточным механизмом и через систему рычагов передаются на стрелку 4 с пером 5, которое заполняется специальными чернилами.

Регистрирующей частью барографа является барабан 3 с часовым механизмом внутри. На барабан надевается бумажная лента с делениями. На ленте барографа горизонтальные линии соответствуют атмосферному давлению в гПа, а вертикальные дуги – времени.

Зажим 6 позволяет отводить стрелку с пером от барабана в сроки замены ленты. Показания барографа контролируются данными ртутного барометра. Для этого в сроки наблюдений на ленте барографа делается засечка при помощи кнопки 7. Барографы в зависимости от скорости хода часового механизма бывают суточные и недельные. Обработка ленты суточного барографа осуществляется так же, как и термографа.

## 2. Влажность воздуха и ее измерение

**Общие сведения.** Практически вся влага атмосферы сосредоточена в тропосфере (на высотах 8–18 км). Водяной пар поступает в атмосферу в результате испарения с поверхности Мирового океана, рек, озер, поверхности суши, ледяного и снежного покрова, растительности.

Содержание водяного пара в воздухе характеризуется следующими величинами: абсолютной влажностью, парциальным давлением (упругостью) водяного пара, относительной влажностью, дефицитом упругости водяного пара, точкой росы.

*Абсолютная влажность  $a$*  – количество водяного пара в граммах, содержащееся в  $1 \text{ м}^3$  воздуха при данной температуре ( $\text{г}/\text{м}^3$ ).

*Парциальное давление (упругость) водяного пара  $p_{\text{вп}}$*  – давление, которое имел бы водяной пар, находящийся в воздухе, если бы он занимал объем, равный объему воздуха при той же температуре.

Между абсолютной влажностью и парциальным давлением существует зависимость

$$a = 0,81 \cdot p_{\text{вп}} / (1 + at). \quad (10)$$

Парциальное давление (упругость) водяного пара, находящегося в воздухе, может возрасти до определенного предела, который называется давлением (упругостью) насыщенного водяного пара  $p_{\text{нп}}$ . Вычисленные значения давления насыщенного водяного пара над плоской поверхностью чистой воды представлены в табл. 1.5.

Парциальное давление (упругость) водяного пара вычисляется по психрометрической формуле

$$p_{\text{вп}} = p_{\text{нп}} - A p_a (t - t'), \quad (11)$$

где  $p$  – атмосферное давление, гПа;

$t$  – температура сухого термометра, °С;

$t'$  – температура смоченного термометра, °С;

$A$  – психрометрический коэффициент, зависящий от скорости движения воздуха около резервуара смоченного термометра, °С<sup>-1</sup>.

Для стационарного психрометра  $A = 0,0007947$  °С<sup>-1</sup>, для аспирационного  $A = 0,000662$  °С<sup>-1</sup>.

*Относительной влажностью  $f$*  называется отношение парциального давления (упругости) водяного пара к давлению (упругости) насыщенного водяного пара при данной температуре, выраженное в процентах. Относительная влажность характеризует степень насыщения воздуха водяным паром при данной температуре и выражается формулой

$$f = 100 p_{\text{вп}} / p_{\text{нп}}. \quad (12)$$

*Дефицитом упругости водяного пара  $d$*  называется разность между давлением насыщенного водяного пара  $E$  находящегося в воздухе при данной температуре, и парциальным давлением  $e$ . Дефицит упругости водяного пара измеряется в гПа:

$$d = p_{\text{вп}} - p_{\text{нп}}. \quad (13)$$

*Точкой росы  $t_p$*  называется температура, до которой должен охладиться воздух при данном давлении, чтобы содержащийся в нем водяной пар стал насыщенным. При  $f = 100$  % фактическая температура воздуха совпадает с точкой росы.

Влажность воздуха может быть измерена несколькими методами. Наибольшее распространение получили психрометрический и гигрометрический методы. Приборы, которые используются при измерении влажности воздуха психрометрическим методом, называются психрометрами.

*Психрометрический метод.* Влажность воздуха определяется по разности показаний двух одинаковых психрометрических термометров – сухого и смоченного. С поверхности резервуара смоченного термометра происходит испарение, которое зависит от влажности окружающего воздуха. Чем суше воздух,

тем интенсивнее испарение с резервуара смоченного термометра и тем ниже его показания по сравнению с сухим термометром. Следовательно, по разности показаний сухого и смоченного термометров можно определить влажность воздуха.

*Гигрометрический метод* измерения влажности воздуха основан на использовании свойства обезжиренного человеческого волоса менять свою длину при изменении влажности окружающего воздуха. Удлинение волоса с изменением относительной влажности воздуха происходит неравномерно.

*Стационарный психрометр* состоит из двух одинаковых психрометров с ценой деления  $0,2^\circ$ , помещенных рядом на особом штативе в психрометрической будке и стаканчика для дистиллированной воды (см. рис. 17.7). Левый термометр – «сухой», предназначен для измерения температуры воздуха, а правый – «смоченный», служит для измерения температуры собственного резервуара. Резервуар смоченного термометра плотно обернут батистом, нижний конец которого погружен в стаканчик с дистиллированной водой 2. При помощи батиста обеспечивается капиллярное поступление воды к поверхности резервуара и непрерывное поддержание его во влажном состоянии.

Отсчеты по психрометрическим термометрам производят быстро, причем сначала отсчитывают десятые доли, а потом целые градусы. Для определения влажности воздуха психрометры используются при температурах не ниже  $-10^\circ\text{C}$ .

При температуре ниже  $0^\circ\text{C}$  батист обрезают на 2–3 мм ниже термометра и стаканчик с водой убирают. Смачивают батист за 30 мин до отсчета водой комнатной температуры, погружая резервуар смоченного термометра в стаканчик. Стаканчик убирают после того, как температура смоченного термометра повысится на 2–3° выше  $0^\circ$ ; это значит, что лед на батисте растаял.

*Аспирационный психрометр* очень удобен для измерения влажности воздуха в полевых условиях. По принципу действия он аналогичен стационарному.

Аспирационный психрометр (рис.4) состоит из двух одинаковых психрометрических термометров 1 и 2 с резервуарами цилиндрической формы.

Термометры закреплены в оправе, состоящей из трубки 3, раздваивающейся книзу на две трубочки 5, 6, планок 4 и аспиратора 7. В трубочках 5, 6 имеются еще внутренние трубки 11, 12, в которых помещаются резервуары термометров. Двойные трубки защищают резервуары от нагревания солнечными лучами. Чтобы тепло от корпуса не передавалось к резервуарам, трубки изолируются от него пластмассовыми кольцами 9, 10. Важной частью аспиратора является пружина, которую заводят ключом 8. В результате работы аспиратора вокруг резервуаров термометров создается постоянный ток воздуха со скоростью 2 м/с. Поэтому показания прибора не зависят от скорости ветра.

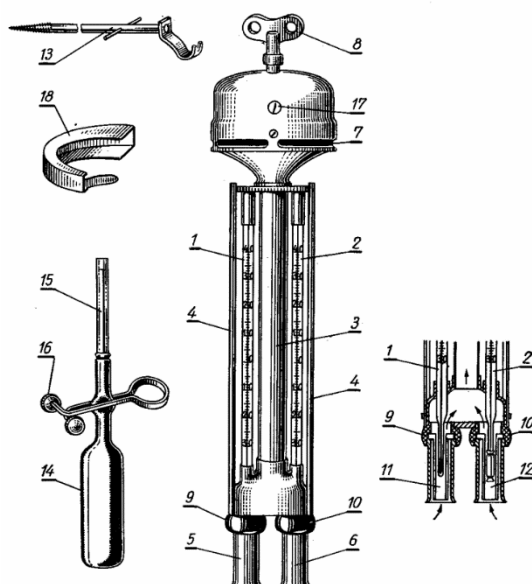


Рис. 4. Аспирационный психрометр: 1, 2 – термометры; 3 – трубка; 4 – планка; 5, 6 – трубочки; 7 – аспиратор; 8 – ключ; 9, 10 – кольца; 11, 12 – трубки; 13 – крюк-подвес; 14 – резиновая груша; 15 – пипетка; 16 – зажим; 17 – винт

Для лучшего отражения солнечных лучей металлические части прибора никелированы.

Психрометр подвешивают за железный крюк-подвес 13, который может быть ввинчен в деревянный столб на требуемую высоту.

Для смачивания батиста пользуются резиновой грушей 14 со стеклянной пипеткой 15 и зажимом 16.

*Волосной гигрометр* применяется для определения относительной влажности воздуха при температуре его ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . Он является основным прибором для наблюдений за влажностью воздуха при отрицательных температурах. Приемной частью гигрометра (рис. 5) служит обезжиренный человеческий волос 1, натянутый на металлическую раму 2. Один конец его закреплен в нижней части регулировочного винта 3, другой – в отверстии металлической дужки 5, насаженной на стержень 6, зажатый винтом 9. Крепление волоса внизу и вверху производится деревянными штифтами 4 и шеллаком. Стержень 6 и стрелка 8 укреплены на одной оси 11. Поэтому изменение длины волоса в результате изменения влажности воздуха вызывает поворот стрелки вокруг оси и смещение ее свободного конца по шкале 10 с делениями от 0 до 100 %.

Цена деления равна 1 % относительной влажности.

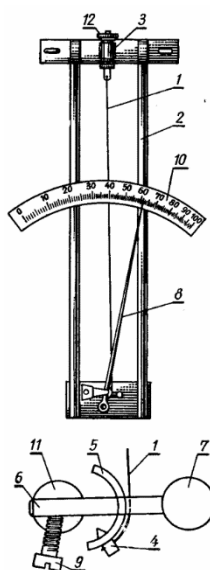


Рис. 5. Волосной гигрометр: 1 – волос;  
2 – рама; 3 – регулировочный винт; 4 – штифт;  
5 – дужка; 6 – стержень; 7, 11 – ось; 8 – стрелка;  
9 – винт; 10 – шкала; 12 – гайка

Так как волос меняет свою длину неравномерно, то и деления шкалы тоже неравные: в начале шкалы они крупнее, чем в конце.

Волосной гигрометр устанавливают в психрометрической будке между сухим и смоченным термометрами. Перед подготовкой гигрометра к работе стрелку устанавливают соответственно показаниям психрометра. Отсчеты по гигрометру производят с точностью до 1%. Волосной гигрометр – относительный прибор, поэтому в его показания вводят поправку, которую получают путем сравнения показаний гигрометра с показаниями психрометра.

*Гигрограф волосной* применяется для непрерывной регистрации изменений относительной влажности воздуха (рис.6).

Приемной частью волосного гигрографа, которая реагирует на изменение относительной влажности, является пучок обезжиренных человеческих волос 1, размещенных в рамке, которая располагается за пределами корпуса прибора. Изменения длины пучка волос передаются через систему рычагов 3, 4 на стрелку 5, на конце которой крепится перо 6. В средней части пучок волос оттянут крючком 2, соединенным с криволинейным рычагом 3, способным вращаться вокруг своей оси. Криволинейный рычаг 3 скользит по другому криволинейному рычагу 4, который имеет общую со стрелкой 5 ось. Для регулировки точности записи пера 6 служит установочный винт 7, при помощи которого регулируется необходимое натяжение пучка волос. При увеличении относительной влажности пучок волос удлиняется, а стрелка с пером перемещается вниз вдоль ленты барабана.

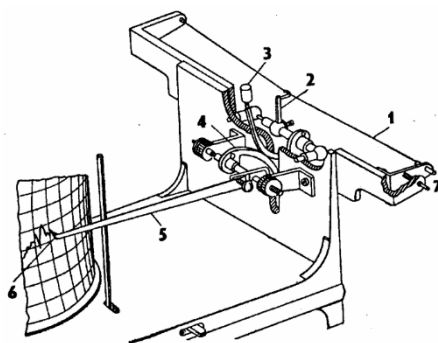


Рис.6. Гигрограф волосной: 1 – пучок волос; 2; 3, 4 – рычаги; 5 – стрелка; 6 – перо

Регистрирующей частью гигрографа служит барабан с часовым механизмом. В зависимости от скорости вращения барабана гигрографы различают суточные и недельные. На барабан надевают бумажную ленту, на которой параллельные горизонтальные линии соответствуют относительной влажности воздуха в процентах, вертикальные дуги – времени; на суточных лентах одно деление равно 15 мин, а на недельных – 2 ч.

Для подготовки гигрографа к работе заводят часовой механизм, накладывают на барабан ленту, на которой отмечают время установки, и ставят перо на заданное время и соответствующую влажность с помощью установочного винта 7.

Так как гигрограф является относительным прибором, то результаты измерения гигрографа сравнивают с показаниями психрометра. Для этой цели в сроки наблюдений по психрометру легким подъемом пера делают засечки на ленте гигрографа.

Обработка ленты гигрографа производится графическим способом. Для этого строят график по отсчетам психрометра и отсчетам, снятым с ленты гигрографа: по оси абсцисс, откладывают относительную влажность воздуха по гигрографу, по оси ординат – относительную влажность по психрометру. Среди полученных точек на графике проводят линию, по которой определяют исправленные показания гигрографа. Дальнейшая обработка ленты заключается в том, что, пользуясь графиком, для каждого показания гигрографа, снятого с ленты, находят с точностью до 1 % соответствующее ему значение по психрометру и заносят в таблицу.