

# Лекция № 11

## Тема 3.1. Автономные приборы измерения высотно-скоростных параметров

1. Виды воздушных давлений (полное, статическое, динамическое) и приемники воздушных давлений
2. Системы статического и полного давлений ВС ГА.
3. Стандартная атмосфера СА-81 и международная стандартная атмосфера МСА
4. Виды высот полета ВС и барокоррекции (QFE и QNH)
5. Барометрические и гипсометрические формулы

## Измерители аэрометрических параметров

Приборы и системы, измеряющие пилотажно-навигационные параметры, определяемые свойствами воздушного потока (высотно-скоростные параметры), обтекающего ВС во время полета, получили наименование аэрометрических.

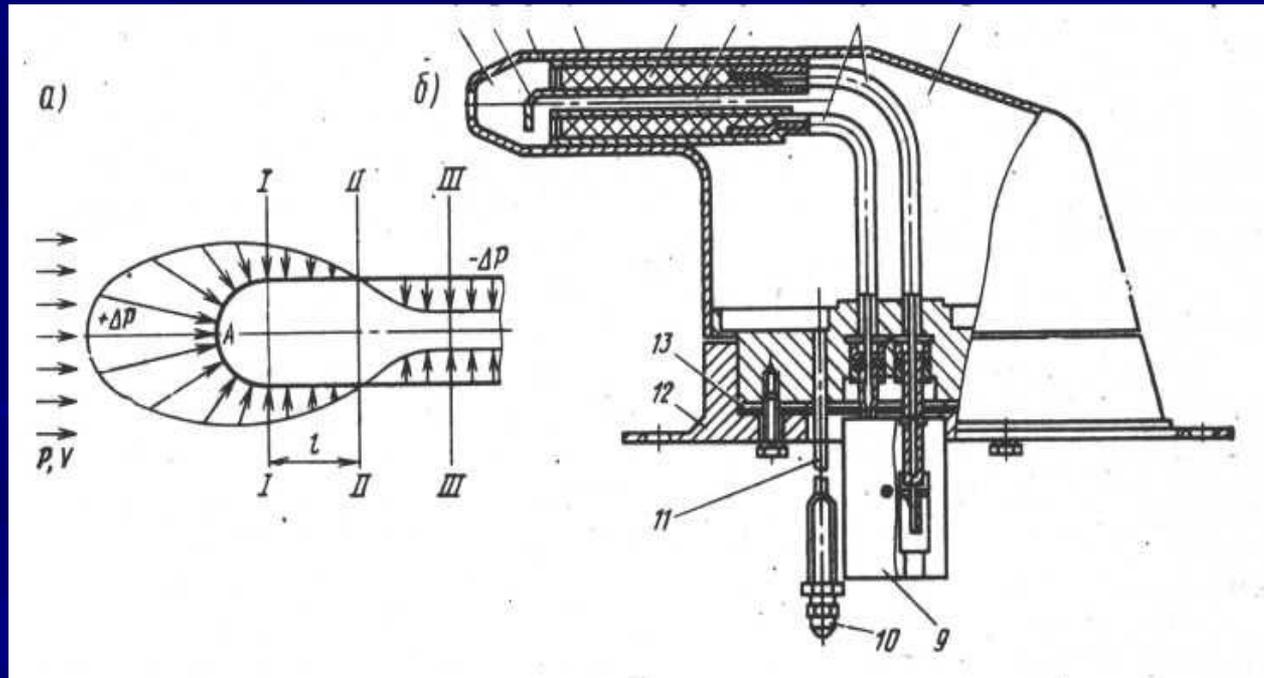
К основным аэрометрическим параметрам относятся:

- абсолютная  $H_a$  (или относительная  $H$ ) барометрическая высота;
- истинная  $V$ , индикаторная  $V_i$  и приборная  $V_{пр}$  воздушные скорости;
- скоростной напор  $q$
- число  $M$  полета;
- вертикальная скорость  $V_y$  ;
- углы атаки и скольжения ;
- температура наружного воздуха  $T_n$  .

# 1. Виды воздушных давлений (полное, статическое, динамическое) и приемники воздушных давлений

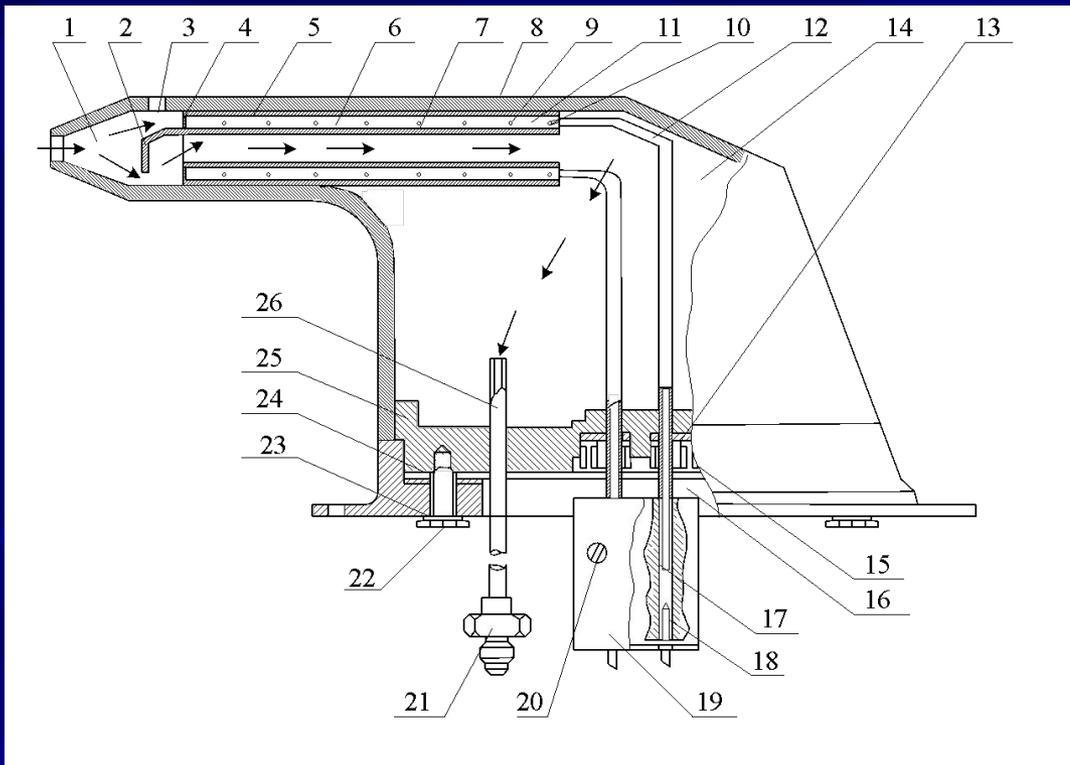
Бортовая система питания аэрометрических приборов и систем предназначена для восприятия, передачи и распределения на аэрометрические приборы и системы статического и полного воздушных давлений во время движения ВС.

Под **статическим давлением** понимают давление, оказываемое воздушной средой на единицу боковой поверхности тела, движущегося в воздушной среде с ее скоростью



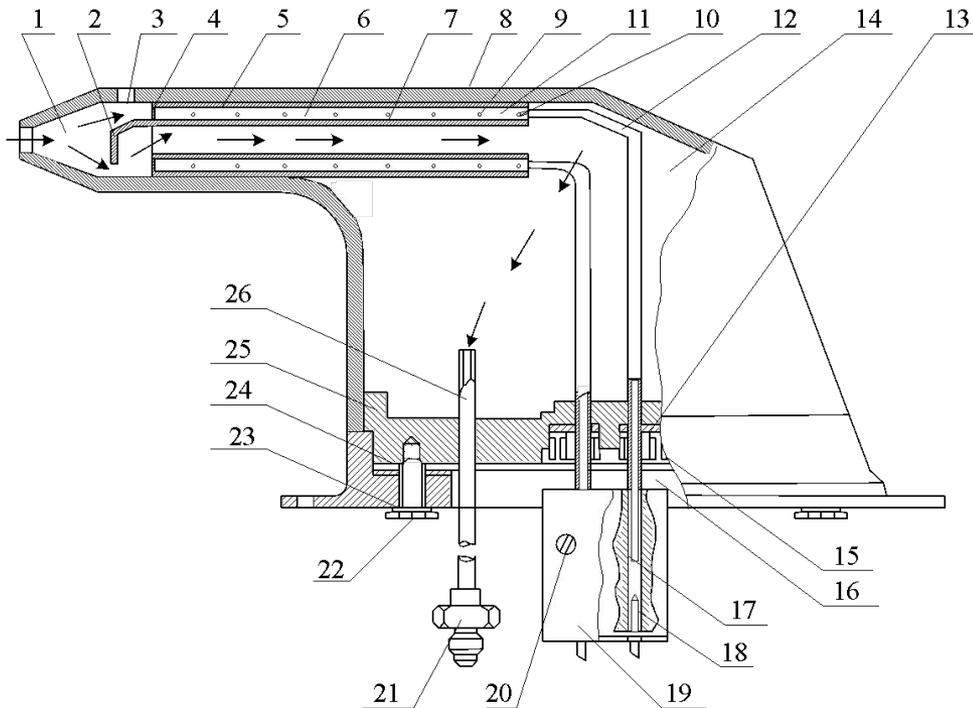
# 1. Виды воздушных давлений (полное, статическое, динамическое) и приемники воздушных давлений

**Под полным давлением  $p_n$**  понимают давление, приходящееся на единицу поверхности тела, плоскость которого перпендикулярна вектору скорости  $V$  набегающего потока. Давление  $p_n$  равно сумме статического давления  $p$  и динамического  $p_{дин}$   $P_n = P_{ст} + P_d$



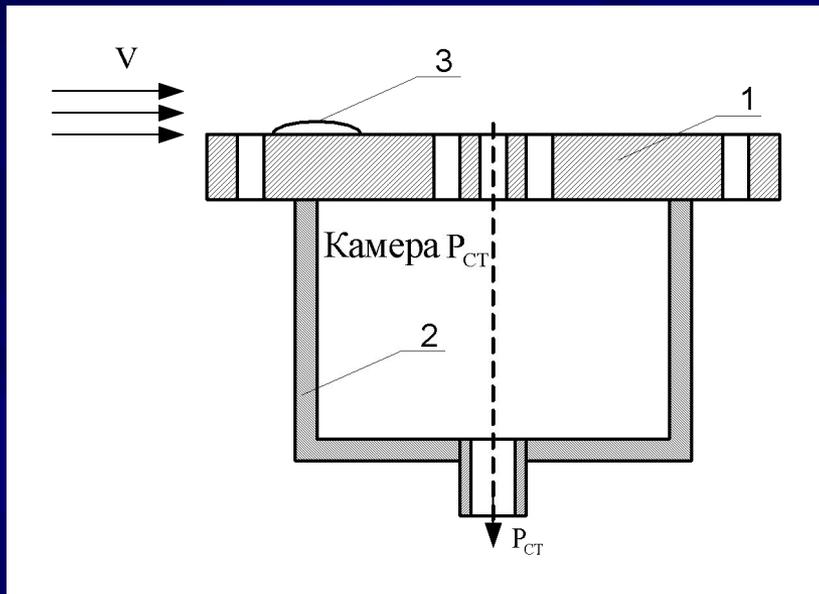
Воздушный поток со скоростью  $V$  тормозится у входа в камеру 1. В результате давление в камере равно давлению  $P_n$ , которое через трубку 6, камеру 8, пневмопровод 26 подается на штуцер 21, подключаемый к магистрали полного давления.

## Приемники полного давления



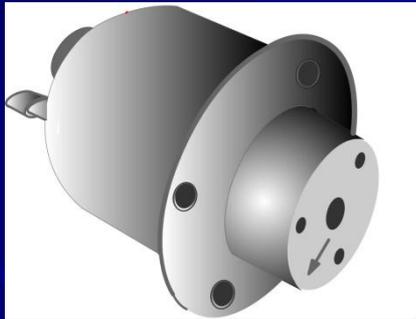
Дренажные отверстия 3 с козырьком 2 в корпусе 4 предназначены для отвода влаги из камеры 1. Приемник обогревается элементом 5 из никелевой проволоки, питаемой напряжением, подводимым через штепсельный разъем 19 по проводам 12. Приемник крепится к фланцу 23. Герметичность камеры 14 обеспечивается прокладкой 24.

## Приемники статического давления ВС ГА



Для удобства и надежности восприятия  $P_{ст}$  вместо отверстий в фюзеляже применяется стандартная плита с отверстиями. Вместе с корпусом она образует прибор для восприятия статического давления.

Плита приемника устанавливается на ВС заподлицо с обшивкой. Для исключения влияния скольжения на воспринимаемое давление приемники левого и правого бортов соединены между собой попарно (закольцованы).



Внешний вид плиточного приемника статического давления ПДС-ВЗ (диапазон скоростей при восприятии  $P_{ст}$  до 450 км/ч; масса 0,25 кг; обогрев напряжением постоянного тока 27 В при мощности до 60 Вт)

## Объединенные приемники полного и статического давления

Предназначены для восприятия и передачи в бортовую систему питания одновременно полного и статического давлений. В этом приборе совмещены два прибора: приемники  $P_p$  и  $P_{ст}$ . Конструктивно такие приемники выполнены в виде полый трубки, обращенной открытым концом к набегающему потоку

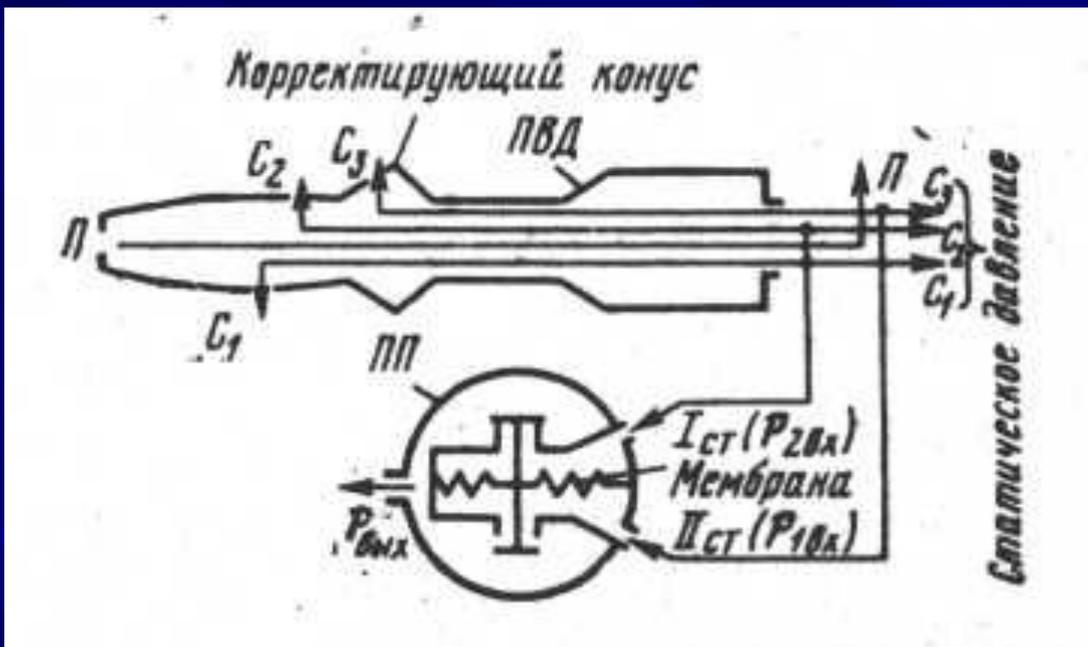


Схема ПВД с корректирующим конусом

Переключение камер в зависимости от скорости полета осуществляется с помощью пневмопереключателя ПП в зависимости от знака разности давлений в камерах с отверстиями  $C_1$  ( $C_2$ ) и  $C_3$ .

При  $M < 1$  -  $P_{ст}$  ( $C_3$ )

При  $M > 1$  -  $P_{ст}$  ( $C_2, C_1$ )

## Погрешности ПВД

Приемникам воздушных давлений свойственны погрешности. К погрешностям восприятия статического давления относят **аэродинамические погрешности:**

- из-за погрешности эксперимента (при снятии характеристик приемников вследствие неточности средств измерения;
- из-за неточности изготовления приемника;
- вследствие влияния условий в месте установки приемника на самолете. С целью компенсации аэродинамических погрешностей восприятия статического давления может быть использован вычислитель аэродинамической поправки (ВАП).

## 2. Системы статического и полного давлений ВС ГА

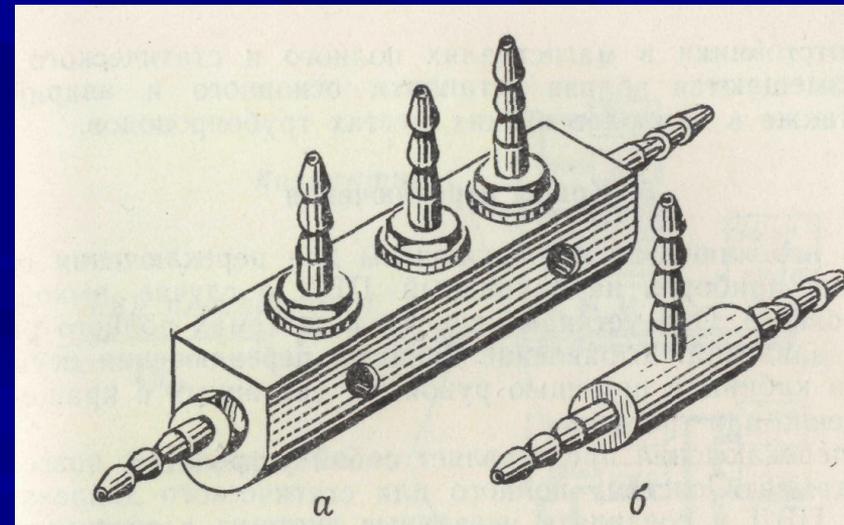
В состав бортовых систем питания входят следующие основные элементы:

- приемники полного давления;
- приемники статического давления;
- объединенные приемники полного и статического давлений;
- трубопроводы полного и статического давлений;
- коллекторы;
- переключатели;
- распределительные краны;
- влагоотстойники.

*Влагоотстойники*



*Коллекторы*



## 2. Системы статического и полного давлений ВС ГА

**Распределительные краны** предназначены для переключения систем питания аэрометрических приборов с «основной» системы на «резервную». Они устанавливаются в кабинах экипажа.

**Переключатели** осуществляют непосредственное переключение систем питания. Переключатель представляет собой устройство, позволяющее перекрывать систему полного или статического давления от основного ПВД и соединять указанные системы с соответствующими камерами аварийных приемников, а также переключать с аварийного приемника на основной приемник.

**Трубопроводы** изготовлены из алюминиевых трубок с внутренним диаметром 4 мм. Для удобства технического обслуживания и предотвращения неправильного подключения приборов к системе питания **трубопроводы полного давления окрашиваются в черный цвет**, а **статического давления – в серый**. Подсоединение трубопроводов к приемникам и потребителям производится с помощью дюритовых шлангов, на которые наносится дополнительная маркировка: **на шланги статической системы наносится голубой эмалевой краской поясok шириной 50 мм**, **на шланги системы полного давления – такой же поясok красной эмалевой краской**.

## Системы статического и полного давления ВС ГА (перспектива)

В последние годы ряд отечественных разработчиков приборного оборудования заявили о выпуске приемников воздушного давления нового поколения. Так ОАО «Аэроприбор-Восход» наладило выпуск приемников ПВД-40, ПВД-40-2, ПВД-11, ПВД - 43, ПВД-Ш.

Многофункциональный приёмник воздушных давлений ПВД-40 обеспечивает измерение высотно-скоростных параметров полёта, включая статическое и полное давления, угол атаки, число М. При совместной обработке данных с приёмников, установленных симметрично на правом и левом борту ВС, может быть получена информация о текущем значении местного угла скольжения. Использование приёмников ПВД-40 позволяет минимизировать количество приборов, устанавливаемых на фюзеляже.

На базе четырех ПВД-40 разработана архитектура и аэродинамический облик высокоточной и надежной системы измерения воздушных параметров полета, а также созданы алгоритмы системы измерения, обеспечивающие вычисление всего спектра параметров полета, самоконтроль исправности системы и ее отдельных элементов.

## Особенности эксплуатации системы питания

При эксплуатации системы питания аэрометрических приборов выполняются следующие работы:

- 1) продувка магистралей полного и статического давлений;
- 2) проверка герметичности систем полного и статического давлений;
- 3) проверка работоспособности системы обогрева приемников воздушного давления;
- 4) проверка герметичности и давления срабатывания клапанов пневмопереключателя;
- 5) проверка наличия конденсата во влагоотстойниках и при необходимости удаление его.

Указанные работы выполняются с использованием контрольно-проверочной аппаратуры КПА-ПВД (КПУ-3), УКАМП.

### 3. Стандартная атмосфера СА-81 и международная стандартная атмосфера

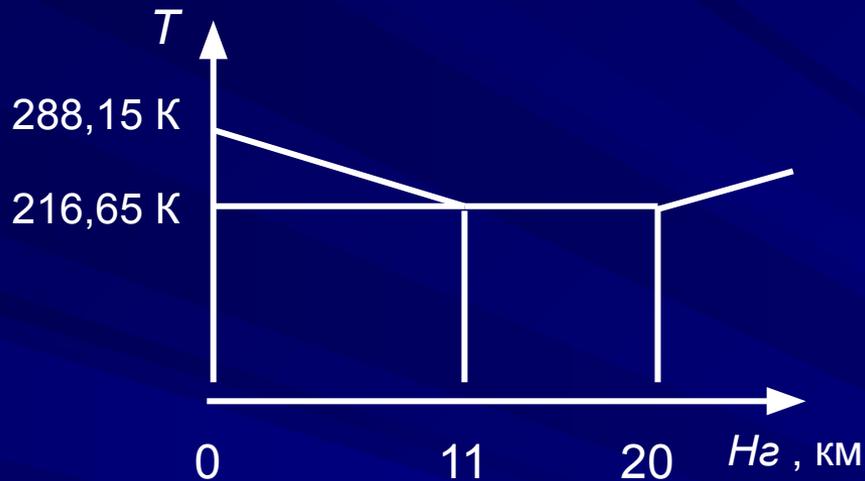
Путем обработки результатов многолетних метеорологических наблюдений была установлена осредненная зависимость изменений параметров воздуха по высоте - математических моделей атмосферы, совокупность которых получила наименование "**стандартная атмосфера**".

Значения параметров атмосферы на нулевой высоте именуется стандартными. Основные из них:

- давление  $P_c = 101,325$  гПа (760 мм рт. ст.);
- температура  $T_c = 288,15$  К ( $15^0$  С);
- плотность  $\rho_c = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>;
- ускорение силы тяжести  $g_c = 9,80665$  м/с<sup>2</sup> (соответствующее значению  $g_m$  на широте  $45^0 32' 33''$  );
- скорость звука  $a_c = 340,294$  м/с.

Принимается, что стандартным параметрам соответствует средний уровень моря.

### 3. Стандартная атмосфера СА-81 и международная стандартная атмосфера



Изменение температуры от высоты по СА-81

В соответствии со стандартной атмосферой принимается, что с увеличением высоты в приземном слое (до 11 000 м) температура воздуха уменьшается в среднем на  $6,5^{\circ}\text{C}$  на каждый км. На высотах 11 ... 20 км температура считается постоянной ( $-56,5^{\circ}\text{C}$ ), а на высотах 20 ... 32 км – увеличивается с градиентом  $+1\text{ C/км}$ .

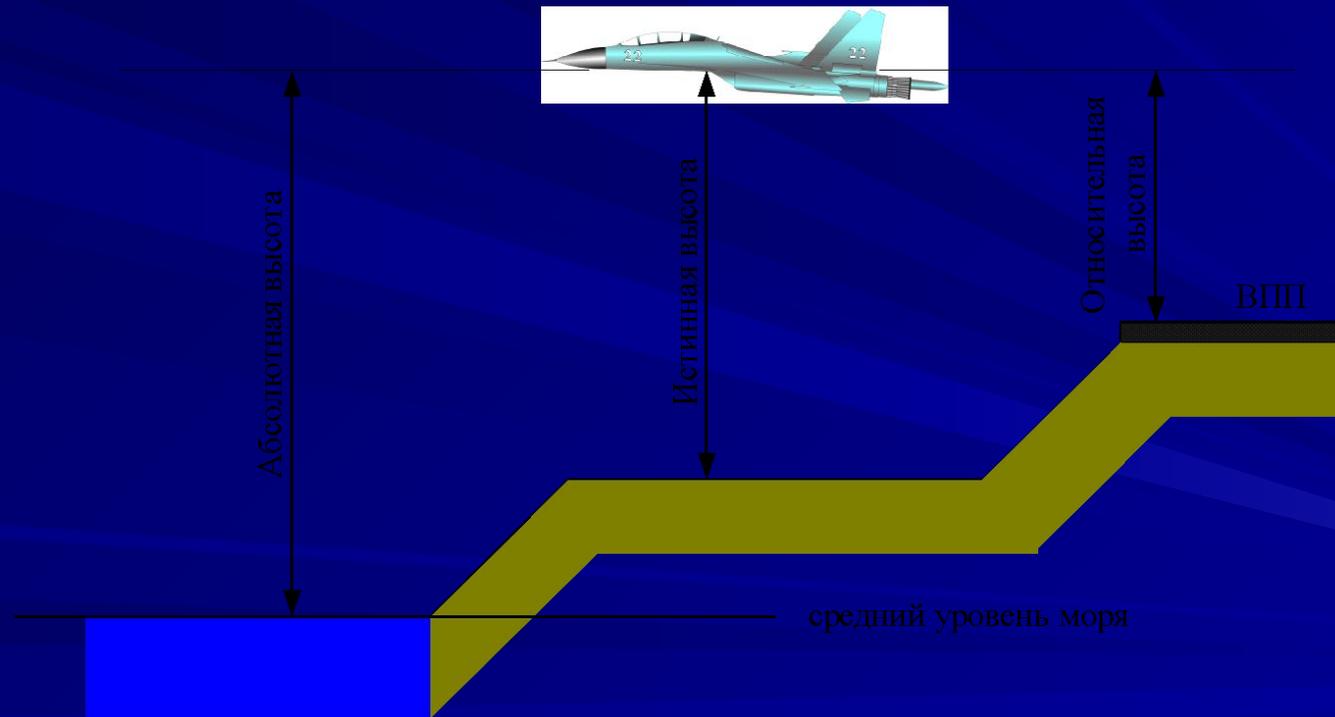
$$T = \begin{cases} T_c + \beta_1 H_z, & \text{при } H_z \leq 11 \text{ км}; \\ T_{11}, & \text{при } 11 \text{ км} < H_z \leq 20 \text{ км}; \\ T_{20} + \beta_3 (H_z - 20000), & \text{при } 20 \text{ км} < H_z \leq 32 \text{ км}; \end{cases}$$

$\beta_i$  - температурные градиенты по высоте, соответственно равные:

$$\beta_1 = -6,5 \cdot 10^{-3} \text{ К/м}, \quad \beta_2 = 0, \quad \beta_3 = 10^{-3} \text{ К/м}, \quad T_{11} = 216,65 \text{ К}, \quad T_{20} = T_{11}.$$

## 4. Виды высот и виды баррокоррекции

*Высотой полета ВС* называется расстояние по вертикали от ВС (обычно центра масс, иногда – нижней точки выпущенного шасси) до некоторого уровня (поверхности), принятого за начало отсчета. В зависимости от уровня, принимаемого за начало отсчета, различают истинную, относительную и абсолютную высоты



## Виды барокоррекции (QFE и QNH)

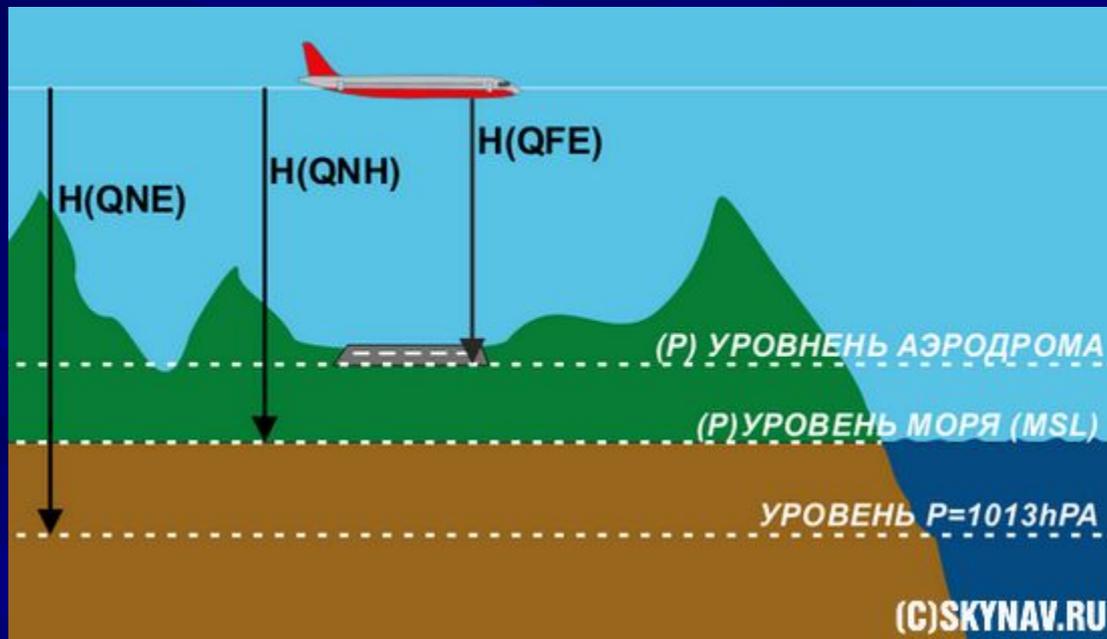
9

Согласно ФАП-128 «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации РФ»: при полетах ниже высоты (эшелоны) перехода используются давления QNH и QFE.

**QFE** означает давление уровня аэродрома, когда высотомеры на самолете на земле показывают «ноль», **QNH** – давление, приведенное к уровню моря, когда высотомеры на самолете на земле показывают превышение аэродрома над условным уровнем моря.

**QNE** – стандартное давление, **760 mmHg; 1013,25 hPA**

В условиях стандартной атмосферы 1 мм ртутного столба соответствует **11** метрам высоты. Абсолютной высоте соответствует давление QNH, а относительной – давление QFE.

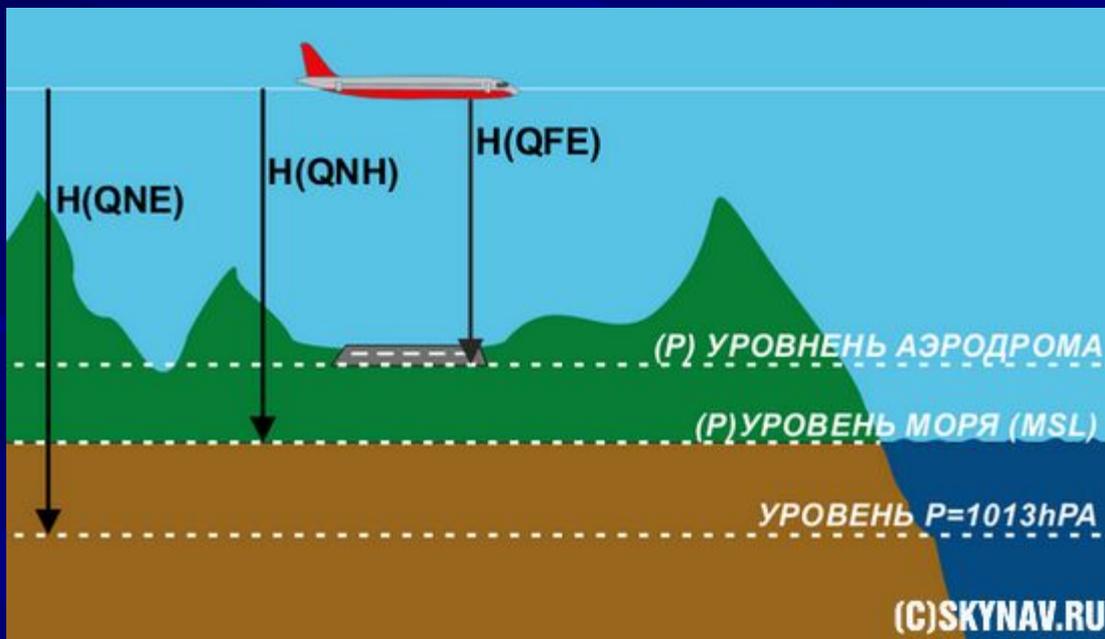


$$QNH = QFE + H_{\phi}/11$$

## Виды барокоррекции (QFE и QNH)

8

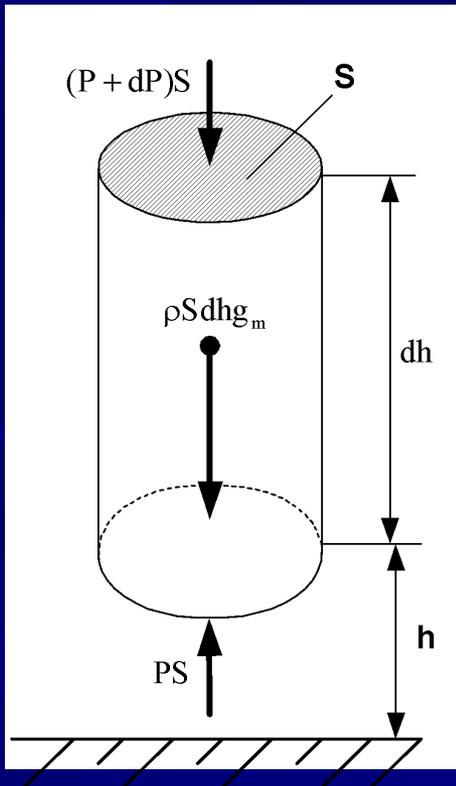
В зависимости от правил применяемых в конкретной стране и авиакомпании, при подготовке к вылету на высотомере устанавливают текущее значение **QNH** или **QFE** аэродрома вылета. Далее в наборе высоты на так называемой **высоте перехода**, как следует из названия, осуществляется «переход» на **стандартное давление (QNE)**. Высота перехода может быть как своя на каждом аэродроме (как правило, 1000-2000 метров), так и единая на территории государства. Полет по маршруту выше высоты перехода выполняется по давлению **QNE**, т.е. по стандартному. В снижении, пересекая **эшелон перехода**, экипаж устанавливает **QNH** или **QFE** измеренные на аэродроме посадки.



У **QNH** есть единственный обоснованный недостаток: при полете в районе аэродрома требуется постоянно держать в голове превышение этого аэродрома. Гораздо логичнее было бы при посадке увидеть на высотомере ноль, что собственно и дает применение **QFE**.

## 5. Барометрические и гипсометрические формулы

Для нахождения зависимости высоты от параметров атмосферы рассмотрим на высоте  $h$  равновесие столбика воздуха в виде элементарного круглого цилиндра с площадью основания  $S$  и образующей  $dh$ , направленной по вертикали. Столбик находится в равновесном состоянии при равновесии действующих на него вертикальных сил давления  $(P + dP)S$ ,  $PS$  и тяжести  $\rho S dh g_m$ :



$$dPS + \rho S dh g_m = 0$$

Уравнение статики атмосферы  $\frac{dP}{dh} = -\rho g_m$  (1)

Для воздуха как для идеального газа

$$\rho = \frac{P}{R_{y0} T} \quad (2)$$

где  $R_{y0}$  - удельная газовая постоянная, для воздуха до высот  $\approx 100$  км она остается постоянной (287,05287 Дж/кг.К)

## 5. Барометрические и гипсометрические формулы

$$\rho = \frac{P}{R_{y\partial} T} \longrightarrow \frac{dP}{dh} = -\rho g_m \longrightarrow \frac{dP}{P} = -\frac{g_m}{R_{y\partial} T} dh \quad (3)$$

В выражении (3) кроме давления и высоты по прежнему остаются две переменные, зависящие от высоты:  $g_m$  и  $T$ .

Представим Землю в виде сферы и на основе закона тяготения

$$g_m(h) = g_c \frac{r_3^2}{(r_3 + h)^2}$$

$r_3$  - условный радиус Земли (6 356 766 м), при котором  $g_m = g_c$

С целью упрощения решения дифференциального уравнения (3), "заморозим" величину  $g_m$ , полагая ее на всех высотах постоянной и равной стандартному значению  $g_m = g_c$ . Для этого введем новую переменную  $H_z$  с размерностью высоты из условия

$$g_m dh = g_c dH_z.$$

## 5. Барометрические и гипсометрические формулы

$$g_m dh = g_c dH_z.$$

Переменная  $H_z$  имеет вполне определенный физический смысл

$$H_z = \frac{\int_0^h g_m(h) dh}{g_c} \quad (4)$$

Величина, стоящая в числителе выражения (4), равна работе, необходимой для подъема единичной массы от уровня моря до высоты  $h$ , т. е. потенциалу поля силы тяжести  $\Phi$ , или геопотенциалу

$$\Phi = \int_0^h g_m(h) dh$$

**Геопотенциал  $\Phi$**  выражает удельную (отнесенную к единице массы) потенциальную энергию частиц атмосферы относительно нулевого уровня (среднего уровня моря).

Таким образом, переменная  $H_z$  пропорциональна геопотенциалу и имеет размерность высоты. Она определяется как отношение геопотенциала в данной точке к стандартному ускорению свободного падения и получила наименование **геопотенциальной высоты  $H_z$** :

$$H_z = \frac{\Phi}{g_c}$$

## 5. Барометрические и гипсометрические формулы

Оценим разницу между величинами  $H_g$  и  $h$ .

$$g_m(h) = g_c \frac{r_3^2}{(r_3 + h)^2} \longrightarrow H_g = \frac{\int_0^h g_m(h) dh}{g_c} \longrightarrow H_g = r_3^2 \int_0^h \frac{dh}{(r_3 + h)^2} = \frac{r_3 h}{r_3 + h}$$

Таким образом,  $H_g \leq h$ , т. е. геопотенциальная высота всегда меньше геометрической (они равны только в нулевой точке), причем разность  $\Delta H_g = h - H_g$  составляет

$$\Delta H_g = \frac{h^2}{r_3 + h}$$

С увеличением высоты величина  $\Delta H_g$  растет.

При полете в нижних слоях атмосферы различие между  $h$  и  $H_g$  невелико.

Например, для  $h = 5$  км  $H_g$  составляет 4 м, для высот 16 и 20 км соответственно 16 и 63 м.

## 5. Барометрические и гипсометрические формулы

Без практического ущерба можно в выражении  $\frac{dP}{P} = -\frac{g_m}{R_{y0}T} dh$

перейти от геометрической высоты  $h$  к геопотенциальной  $H_z$

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g_c dH_z}{R_{y0}T} \quad (5)$$

Будем полагать, что температура  $T$  с подъемом на высоту изменяется в соответствии со стандартной атмосферой

$$T = \begin{cases} T_c + \beta_1 H_z, & \text{при } H_z \leq 11 \text{ км;} \\ T_{11}, & \text{при } 11 \text{ км} < H_z \leq 20 \text{ км;} \\ T_{20} + \beta_3 (H_z - 20000), & \text{при } 20 \text{ км} < H_z \leq 32 \text{ км;} \end{cases}$$

где  $\beta_i$  - температурные градиенты по высоте, соответственно равные:  
 $\beta_1 = -6,5 \cdot 10^{-3}$  К/м,  $\beta_2 = 0$ ,  $\beta_3 = 10^{-3}$  К/м,  $T_{11} = 216,65$  К,  $T_{20} = T_{11}$ .

## Барометрические формулы

$$T = \begin{cases} T_c + \beta_1 H_z, \\ T_{11}, \\ T_{20} + \beta_3 (H_z - 20000), \end{cases} \longrightarrow \frac{dP}{P} = -\frac{g_c dH_z}{R_{y\partial} T}$$

Для  $H \leq 11$  км  $\int_{P_c}^P \frac{dP}{P} = -\frac{g_c}{R_{y\partial}} \int_0^{H_z} \frac{dH_z}{T_c + \beta_1 H_z} \longrightarrow P_{CA} = P_c \left( 1 + \frac{\beta_1}{T_c} H_z \right)^{-\frac{g_c}{\beta_1 R_{y\partial}}}$

$11 \text{ км} < H_z < 20 \text{ км}$   $P_{CA} = P_{11} \exp \left[ -\frac{g_c}{R_{y\partial} T_{11}} (H_z - 11000) \right]$   $P_{11} = 22,632 \text{ гПа}$   
(169,75 мм рт.ст.)

$20 \text{ км} < H_z < 32 \text{ км}$   $P_{CA} = P_{20} \left[ 1 + \frac{\beta_3}{T_{20}} (H_z - 20000) \right]^{-\frac{g_c}{\beta_3 R_{y\partial}}}$   $P_{20} = 5474,9 \text{ гПа}$   
(41,07 мм рт.ст.)

Формулы (6)...(8) называются **барометрическими формулами стандартной атмосферы**. Они устанавливают зависимость по СА-81 атмосферного (статического) давления от геопотенциальной высоты.

# Гипсометрические формулы

Высота  $H_a$ , которая ставится по формулам (6)...(8) в соответствие фактическому статическому давлению  $P_{cm}$ , называется в авиации абсолютной барометрической высотой.

Из (6)...(8) после преобразований получим, заменяя  $H_z$  на  $H_a$ :

$$H_a = \frac{T_c}{\beta_1} \left[ \left( \frac{P_{cm}}{P_c} \right)^{\frac{R_{y0}\beta_1}{g_c}} - 1 \right] \quad (9) \quad H_a < 11 \text{ км} \quad P_{CA} = P_c \left( 1 + \frac{\beta_1}{T_c} H_z \right)^{-\frac{g_c}{\beta_1 R_{y0}}}$$

$$H_a = 11000 + \frac{R_{y0} T_{11}}{g_c} \ln \frac{P_{11}}{P_{cm}} \quad (10) \quad 11 \text{ км} < H_a < 20 \text{ км}$$

$$H_a = 20000 + \frac{T_{20}}{\beta_3} \left[ \left( \frac{P_{cm}}{P_{20}} \right)^{\frac{R_{y0}\beta_3}{g_c}} - 1 \right] \quad (11) \quad 20 \text{ км} < H_a < 32 \text{ км}$$

Формулы (9)...(11) называются **гипсометрическими формулами стандартной атмосферы**. Формулы служат для градуировки барометрических высотомеров.