

# Основные свойства воздуха

("Аэродинамика и динамика полета самолета" Вотяков А.А.; Каюнов Н.Т.; глава 1)

## Атмосфера земли

Атмосферой называется газовая оболочка, окружающая земной шар. Газ, составляющий эту оболочку, называется воздухом.

Атмосфера разделяется на тропосферу, стратосферу и ионосферу. Такое разделение основано на физических свойствах этих слоев и характере их изменения с подъемом на высоту. Давление и плотность воздуха с увеличением высоты во всех трех слоях атмосферы уменьшается.

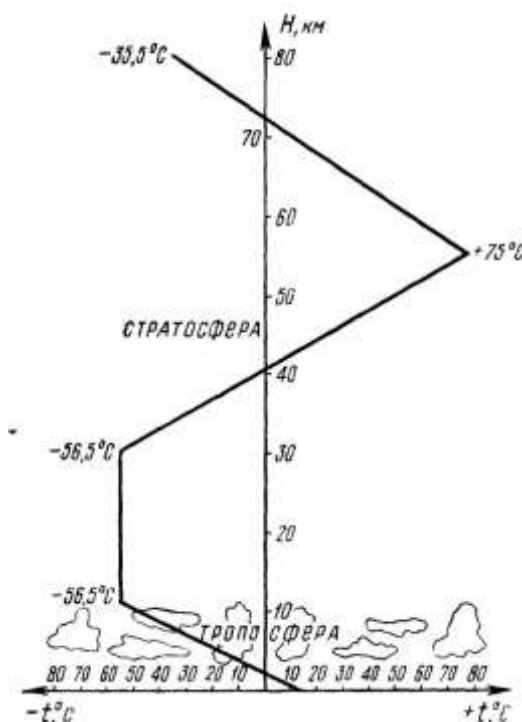


Рис. 1 Изменение температуры воздуха по высотам для стандартных условий средней широты

Тропосферой называется нижний слой атмосферы. Толщина ее над полюсами 7 - 8 км, над экватором 16 - 18 км, высота верхней границы изменяется в зависимости от характера поверхности Земли, атмосферных процессов, теплового состояния воздуха, а также от суточных и годовых изменений. Температура воздуха в тропосфере с подъемом на высоту падает (6,5° на каждые 1000 м), так как нагрев воздуха обуславливается основным отраженными от земной поверхности солнечными лучами. Изменение температуры воздуха с высотой приводит к перемещению воздушных масс, холодные верхние слои опускаются, а теплые поднимаются. Вследствие этого образуются облака, выпадают осадки, дуют ветры. Из-за перемещения воздушных масс состав воздуха тропосферы практически постоянен. В нем содержится 78% азота, 21% кислорода и около 1% других газов (аргон, углекислый газ, водород, неон, гелий). Кроме указанных газов в тропосфере сосредоточен почти весь водяной пар, находящийся в непрерывном кругообороте (испарение - конденсация и кристаллизация с облакообразованием - осадки). В нижних слоях тропосферы множество различных примесей в виде

мельчайших твердых частиц (пыль). Содержание в воздухе тропосферы водяного пара и пыли приводит к ухудшению видимости.

Стратосфера - слой воздуха, лежащий непосредственно над воздушными слоями тропосферы. В ней наблюдается полное отсутствие облаков и наличие сильных ветров, дующих с большой скоростью и в одном направлении. Вертикальные перемещения воздушных масс отсутствуют. В стратосфере с высоты: на экваторе - 17 км, полюсе - 8 км, средней широте - 11 км и до высоты в среднем 25...30 км температура постоянна и составляет  $-56^{\circ}\text{C}$ . С высоты 30 км и до 55 км температура воздуха повышается до  $+75^{\circ}\text{C}$  вследствие повышенного содержания озона, который обладает способностью поглощать ультрафиолетовое излучение. С высоты 55 км и до 80 км температура воздуха понижается в среднем на  $4^{\circ}\text{C}$  на каждые 1000 м из-за уменьшения процентного содержания озона в воздухе. На высоте 82...83 км температура воздуха составляет  $-35^{\circ}\text{C}$  (рис.1).

Ионосфера - слой воздуха, лежащий непосредственно над воздушным слоем стратосферы. Высоты ионосферы от 85 до 500 км. Из-за наличия в ионосфере огромного количества ионов (заряженных молекул и атомов атмосферных газов, движущихся с большими скоростями) ее воздух сильно нагревается. Воздух ионосферы также характеризуется высокой проводимостью, преломлением, отражением, поглощением и поляризацией радиоволн. В ионосфере из-за вышеуказанных свойств наблюдаются свечения ночного неба, полярные сияния, магнитные бури.

### **Температура воздуха**

Температура - величина, характеризующая степень теплового состояния тела (газа) или скорость хаотического движения молекул (чем выше температура, тем больше скорость их движения, и наоборот). Температуру воздуха можно измерять по двум шкалам: Цельсия и абсолютной шкале Кельвина. За нуль градусов по шкале Цельсия принято считать температуру таяния льда, а за  $100^{\circ}$  - температуру кипения воды при атмосферном давлении, равном 760 мм рт. ст.

### **Абсолютная температура**

Температура, отсчитываемая от абсолютного нуля по шкале Кельвина, называется абсолютной температурой.

За нуль Кельвинов (К) принята температура, при которой прекращается тепловое передвижение молекул, она составляет  $-273^{\circ}$  по шкале Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### **Давление воздуха**

Давление - это сила, действующая на единицу площади перпендикулярно к ней. Всякое тело, находящееся в неподвижном воздухе, испытывает со стороны последнего давление, одинаковое со всех сторон (закон Паскаля). Атмосферное давление объясняется тем, что воздух подобно всем другим веществам обладает весом и притягивается землей.

Атмосферным давлением называется давление, вызываемое весом вышележащих слоев воздуха и ударами его хаотически движущихся молекул. За единицу давления принята техническая атмосфера (атм.) - давление, равное

одному килограмму силы на один квадратный сантиметр ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ ). Давление обозначается буквой  $P$ , на уровне моря -  $P_0$ .

По международной системе СИ давление измеряется в Паскалях, т. е. в ньютонах на квадратный метр ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ).

Барометрическое давление - это давление, измеренное в миллиметрах ртутного столба (мм.рт.ст.). Обозначается буквой  $B$ , на уровне моря -  $B_0$ .

Стандартным барометрическим давлением называется давление на уровне моря в мм.рт.ст. Оно в зависимости от температуры и влажности колеблется от 700 до 800 мм.рт.ст. и в среднем равно 760 мм.рт.ст.

В физике под барометрическим давлением 1 атм. подразумевается давление воздуха, равное  $1,0332 \text{ кгс}/\text{см}^2$  или стандартному барометрическому давлению 760 мм.рт.ст.

### **Плотность воздуха**

Плотность воздуха - это количество воздуха, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  объема. В физике существует понятие двух видов плотности - весовая (удельный вес) и массовая. В аэродинамике чаще всего пользуются массовой плотностью. Весовая плотность (удельный вес) воздуха - это вес воздуха в объеме  $1 \text{ м}^3$ . Обозначается буквой  $\gamma$ .

Установлено, что  $1 \text{ м}^3$  воздуха при стандартных атмосферных условиях (барометрическое давление 760 мм рт. ст.,  $t=+15^\circ\text{C}$ ) весит 1,225 кгс, следовательно, весовая плотность (удельный вес)  $1 \text{ м}^3$  объема воздуха в этом случае равна  $\gamma=1,225 \text{ кгс}/\text{м}^3$ .

Массовая плотность воздуха - это масса воздуха в объеме  $1 \text{ м}^3$ . Обозначается греческой буквой  $\rho$ . Масса тела - величина постоянная. За единицу массы принята масса гири из иридий-платины, хранящейся в Международной палате мер и весов в Париже.

### **Международная стандартная атмосфера**

Чтобы охарактеризовать летные и аэродинамические данные самолетов при одинаковых параметрах воздуха, всеми странами принята единая Международная стандартная атмосфера (МСА). Таблица МСА составлена на основании среднегодовых условий средних широт (широта около  $45^\circ$ ) на уровне моря при влажности нуль процентов и следующих параметрах воздуха:

- барометрическое давление  $B = 760 \text{ мм рт. ст.}$  ( $P_0 = 1,0332 \text{ кгс}/\text{см}^2$ );
- температура  $t = +15^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 288 \text{ K}$ );
- массовая плотность  $\rho_0 = 0,00125 \text{ кгс}/\text{см}^3$ ;
- удельный вес -  $\gamma = 1,225 \text{ кгс}/\text{см}^3$ .

Согласно МСА температура воздуха в тропосфере падает на  $6,5^\circ\text{C}$  на каждые 1000 м.

Международная стандартная атмосфера используется при градуировании пилотажно-навигационных и других приборов, при инженерных и конструкторских расчетах.

## **Физические свойства воздуха**

Инертность - свойство воздуха сопротивляться изменению состояния покоя или равномерного прямолинейного движения (второй закон Ньютона). Мерой инертности является массовая плотность воздуха. Чем больше массовая плотность воздуха, тем большую силу необходимо приложить к воздуху, чтобы вывести его из состояния покоя или равномерного прямолинейного движения. Следовательно, чем больше сила самолета, действующего на воздух, тем больше сила, действующая со стороны воздуха на самолет (третий закон Ньютона).

Вязкость-свойство воздуха сопротивляться взаимному сдвигу частиц. Молекулы воздуха обладают определенной скоростью беспорядочного хаотического движения, зависящего от температуры, а также скоростью общего поступательного движения. Попадая из быстро движущегося слоя в медленный, молекулы ускоряют движение медленно движущихся молекул, и наоборот - медленно движущиеся молекулы, попадая в быстро движущийся слой воздуха, притормаживают быстро движущиеся молекулы.

При движении самолета в воздушном потоке возникает сопротивление трения, которое определяет вязкость воздуха. Вязкость воздуха также определяет динамический коэффициент вязкости. Чем больше температура воздуха, тем больше коэффициент вязкости, обусловленный увеличением хаотического движения молекул и ростом эффективности воздействия одного слоя воздуха на другой.

Сжимаемость - свойство воздуха изменять свою плотность при изменении давления.

Способность воздуха сжиматься объясняется большими расстояниями между молекулами. Так как у любого газа (а следовательно, и воздуха) межмолекулярные силы сцепления малы, то газ, всегда стремясь расшириться, занимает весь предоставленный ему объем.

Таким образом, воздух при изменении объема или сжимается, или расширяется. При этом соответственно изменяется и его плотность: при увеличении объема она уменьшается, а при уменьшении увеличивается. Со сжимаемостью связана скорость распространения в воздухе звуковых волн.

Под звуковыми волнами следует понимать всякие малые возмущения плотности и давления, распространяющиеся в воздухе, а под скоростью звука - скорость распространения этих возмущений.

### **Основные законы движения воздуха. Установившийся воздушный поток.**

Установившимся воздушным потоком называется такое течение воздуха, при котором скорость потока в любой точке, а также основные параметры (давление, температура и плотность) не изменяются с течением времени. В аэродинамике рассматривают только установившийся воздушный поток.

### **Ламинарный и турбулентный воздушный поток**

Ламинарный - это воздушный поток, в котором струйки воздуха движутся в одном направлении и параллельны друг другу.

При увеличении скорости до определенной величины струйки воздушного потока кроме поступательной скорости также приобретают быстро меняющиеся скорости, перпендикулярные к направлению поступательного движения. Образуется поток, который называется турбулентным, т.е. беспорядочным.

### Пограничный слой

Пограничный слой - это слой, в котором скорость воздуха изменяется от нуля до величины, близкой к местной скорости воздушного потока.

При обтекании тела воздушным потоком (Рис 3) частицы воздуха не скользят по поверхности тела, а тормозятся, и скорость воздуха у поверхности тела становится равной нулю. При удалении от поверхности тела скорость воздуха возрастает от нуля до скорости течения воздушного потока.

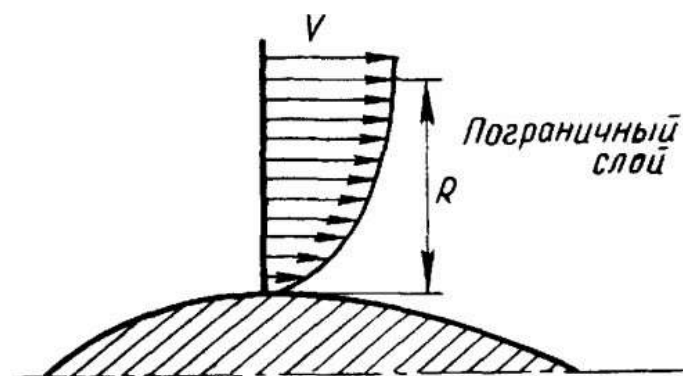


Рис. 2 Изменение скорости течения воздуха в пограничном слое

Толщина пограничного слоя измеряется в миллиметрах и зависит от вязкости и давления воздуха, от профиля тела, состояния его поверхности и положения тела в воздушном потоке. Толщина пограничного слоя постепенно увеличивается от передней к задней кромке. В пограничном слое характер движения частиц воздуха отличается от характера движения вне его.

Позади тела пограничный слой переходит в спутную струю, которая по мере удаления от тела размывается и исчезает. Завихрения в спутной струе попадают на хвостовое оперение самолета и снижают его эффективность, вызывают тряску (явление Бафтинга).

Пограничный слой разделяют на ламинарный и турбулентный (Рис 3). При установившемся ламинарном течении пограничного слоя проявляются только силы внутреннего трения, обусловленные вязкостью воздуха, поэтому сопротивление воздуха в ламинарном слое мало.

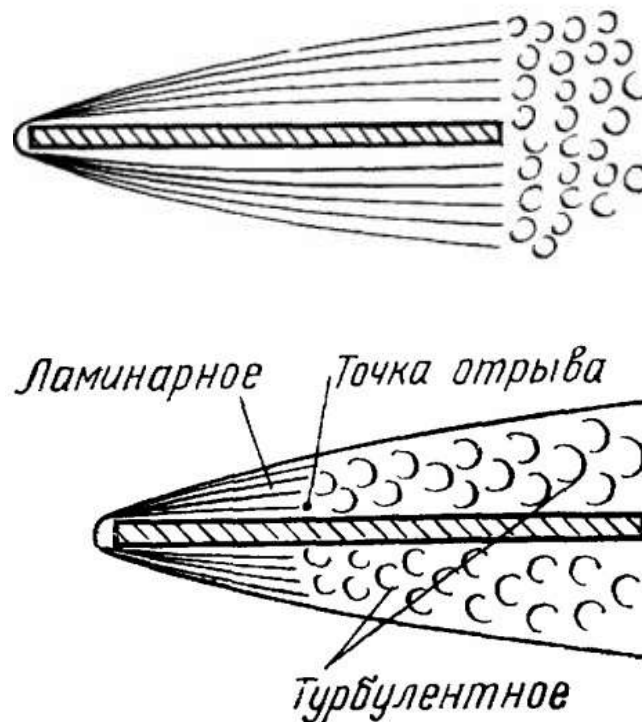


Рис. 3 Ламинарное и турбулентное течение

В турбулентном пограничном слое наблюдается непрерывное перемещение струек воздуха во всех направлениях, что требует большего количества энергии для поддержания беспорядочного вихревого движения и, как следствие этого, создается большее по величине сопротивление воздушного потока движущемуся телу.

При обтекании тела воздушным потоком в определенной точке происходит переход пограничного слоя из ламинарного в турбулентный. Эта точка называется точкой перехода. Расположение ее на поверхности профиля тела зависит от вязкости и давления воздуха, скорости струек воздуха, формы тела и его положения в воздушном потоке, а также от шероховатости поверхности. При создании профилей крыльев конструкторы стремятся отнести эту точку как можно дальше от передней кромки профиля, чем достигается уменьшение сопротивления трения. Для этой цели применяют специальные ламинизированные профили, увеличивают гладкость поверхности крыла и ряд других мероприятий.

При увеличении скорости воздушного потока или увеличении угла положения тела относительно воздушного потока до определенной величины в некоторой точке происходит отрыв пограничного слоя от поверхности, при этом резко уменьшается давление за этой точкой.

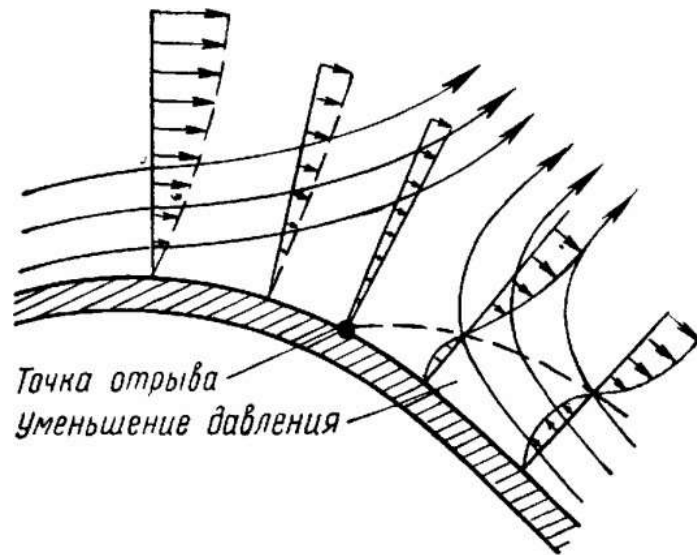


Рис. 4 Течение в пограничном слое вблизи точки отрыва

В результате того, что у задней кромки тела давление больше чем за точкой отрыва, происходит обратное течение воздуха из зоны большего давления в зону меньшего давления к точке отрыва, которое влечет за собой отрыв воздушного потока от поверхности тела (Рис 4).

Ламинарный пограничный слой отрывается легче от поверхности тела, чем турбулентный.

### Статическое давление и скоростной напор. Уравнение Бернулли.

Самолет, находящийся в неподвижном или подвижном относительно него воздушном потоке, испытывает со стороны последнего давление, в первом случае (когда воздушный поток неподвижен) - это статическое давление и во втором случае (когда воздушный поток подвижен) - это динамическое давление, оно чаще называется скоростным напором. Статическое давление в струйке аналогично давлению покоящейся жидкости (вода, газ). Например: вода в трубе, она может находиться в состоянии покоя или движения, в обоих случаях стенки трубы испытывают давление со стороны воды. В случае движения воды давление будет несколько меньше, так как появился скоростной напор.

Согласно закону сохранения энергии, энергия струйки воздушного потока в различных сечениях струйки воздуха есть сумма кинетической энергии потока, потенциальной энергии сил давления, внутренней энергии потока и энергии положения тела. Эта сумма - величина постоянная:

$$E_{\text{кин}} + E_p + E_{\text{вн}} = \text{const}$$

Кинетическая энергия ( $E_{\text{кин}}$ ) - способность движущегося воздушного потока совершать работу. Она равна

$$E_{\text{кин}} = \frac{mV^2}{2}$$

где  $m$  - масса воздуха, кгс с<sup>2</sup>м;  $V$  - скорость воздушного потока, м/с. Если вместо массы  $m$  подставить массовую плотность воздуха  $\rho$ , то получим формулу для определения скоростного напора  $q$  (в кгс/м<sup>2</sup>)

$$q = \frac{\rho V^2}{2}$$

Потенциальная энергия  $E_p$  - способность воздушного потока совершать работу под действием статических сил давления. Она равна (в кгс-м)

$$E_p = PFS,$$

где  $P$  - давление воздуха, кгс/м<sup>2</sup>;  $F$  - площадь поперечного сечения струйки воздушного потока, м<sup>2</sup>;  $S$  - путь, пройденный 1 кг воздуха через данное сечение, м; произведение  $SF$  называется удельным объемом и обозначается  $v$ .

$$E_p = Pv.$$

Рассматривая во взаимосвязи все виды энергии применительно к определенным условиям, можно сформулировать закон Бернулли, который устанавливает связь между статическим давлением в стружке воздушного потока и скоростным напором.

Рассмотрим трубу (Рис 5) переменного диаметра (1, 2, 3), в которой движется воздушный поток. Для измерения давления в рассматриваемых сечениях используют манометры. Анализируя показания манометров, можно сделать заключение, что наименьшее динамическое давление показывает манометр сечения 3-3. Значит, при сужении трубы увеличивается скорость воздушного потока и давление падает.

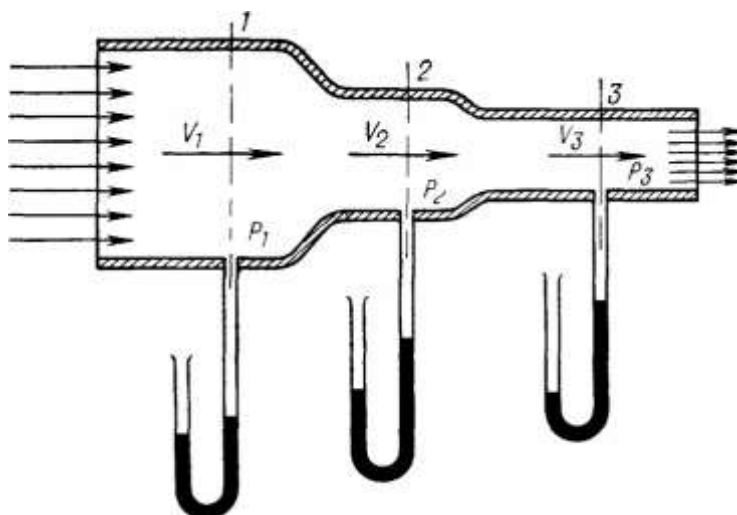


Рис. 5 Объяснение закона Бернулли

Причиной падения давления является то, что воздушный поток не производит никакой работы (трение не учитываем) и поэтому полная энергия воздушного потока остается постоянной. Если считать температуру, плотность и объем



воздушного потока в различных сечениях постоянными ( $T_1=T_2=T_3$ ;  $p_1=p_2=p_3$ ,  $V_1=V_2=V_3$ ), то внутреннюю энергию можно не рассматривать. Значит, в данном случае возможен переход кинетической энергии воздушного потока в потенциальную и наоборот. Когда скорость воздушного потока увеличивается, то увеличивается и скоростной напор и соответственно кинетическая энергия данного воздушного потока.

$$P_1 + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} = P_3 + \frac{\rho_3 V_3^2}{2}.$$

Это уравнение для любого сечения струйки воздуха пишется следующим образом:

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const.}$$

Такой вид уравнения является самым простым математическим уравнением Бернулли и показывает, что сумма статического и динамического давлений для любого сечения струйки установившегося воздушного потока есть величина постоянная. Сжимаемость в данном случае не учитывается. При учете сжимаемости вносятся соответствующие поправки.