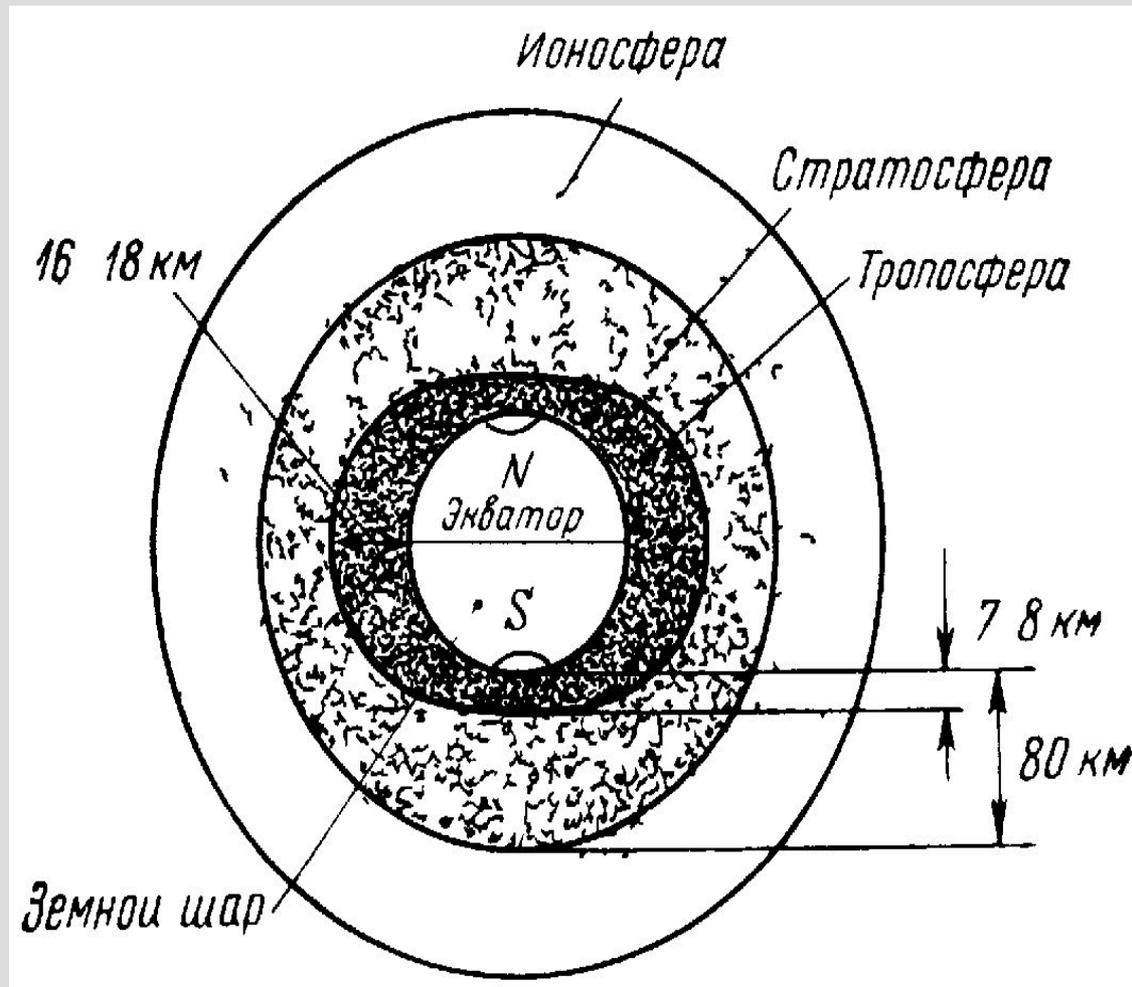


# ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА

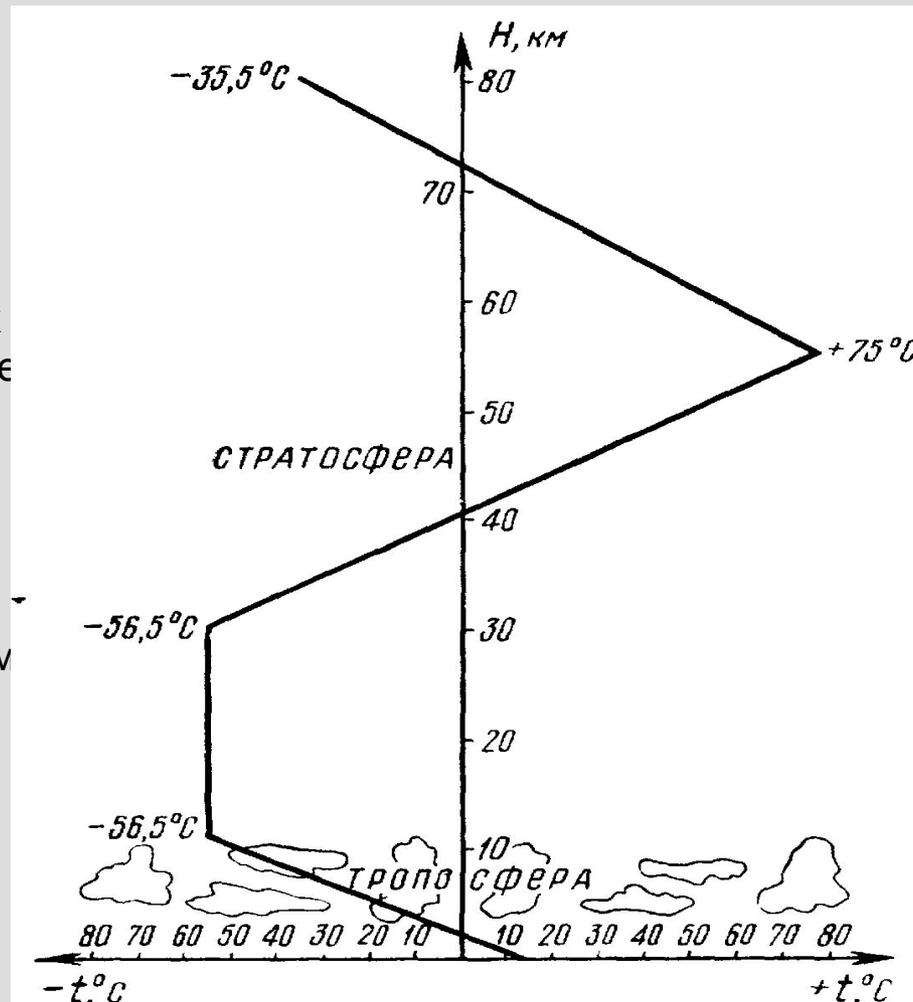
## АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ



# 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



## Изменение **температуры** воздуха по **высотам** для **стандартных условий средней широты** (часть 1)

**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 в основном 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.

## Изменение **температуры** воздуха по **высотам** для **стандартных условий средней широты** (часть 2)

**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°C**. **С высоты 30 км и до 55 км** температура воздуха повышается **до +75°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°C на каждые 1000 м** из-за уменьшения процентного содержания озона в воздухе. На высоте **82...83 км** температура воздуха составляет **-35°C**.

**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

**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° температуру кипения воды при атмосферном давлении, равном 760 мм рт. ст.

## АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

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

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

Если известна температура воздуха  $t$  по шкале Цельсия, то абсолютную температуру можно найти по формуле:

$$T = t + T_0$$

$$T_0 = -273K;$$

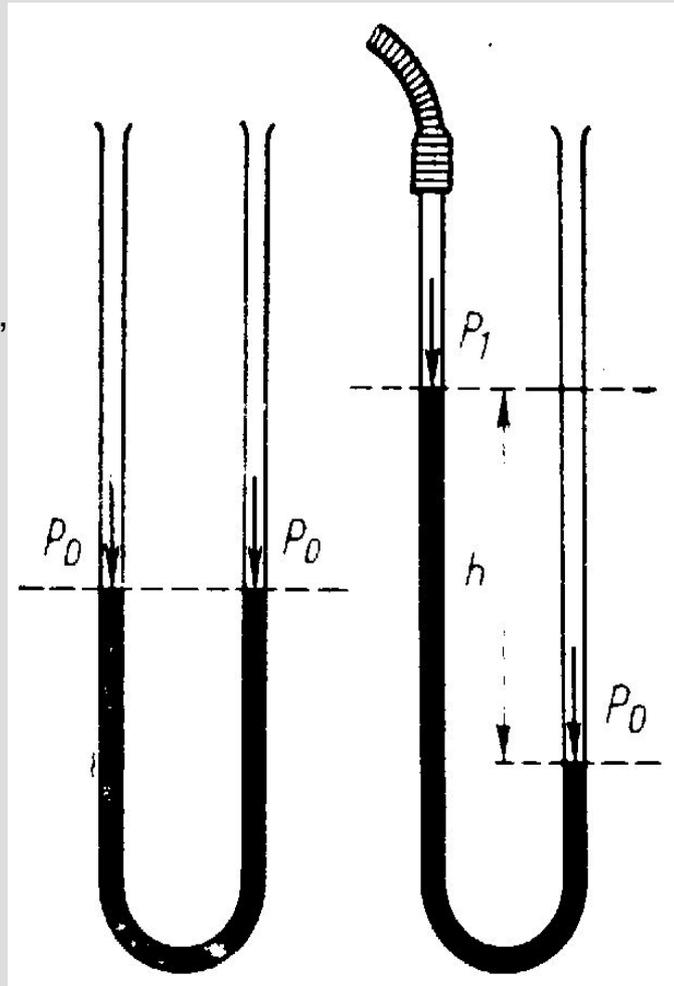
$t$  - температура воздуха по шкале Цельсия.

# 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.



Давление обозначается буквой  $P$ , на уровне моря -  $P_0$ .

При аэродинамических исследованиях часто приходится измерять разность давлений.

Для этого используются ртутные приборы - манометры.

# ПЛОТНОСТЬ ВОЗДУХА

**Плотность воздуха** - это количество воздуха, содержащегося в **1 м<sup>3</sup> 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 м<sup>3</sup>.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА ОТ ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

При изменении давления и температуры изменяется плотность воздуха.

Согласно **закону Бойля-Мариотта** плотность воздуха будет тем больше, чем больше давление, а согласно **закону Гей-Люссака** плотность воздуха тем больше, чем меньше температура воздуха.

Таким образом, можно сделать заключение, что чем выше давление и ниже температура, тем больше плотность воздуха. Поэтому наибольшая плотность воздуха зимой в морозную погоду, а наименьшая летом в теплую погоду. Также следует заметить, что плотность влажного воздуха меньше, чем сухого (при одних и тех же условиях). Поэтому иногда учитывают и влажность, вводя при этом в расчеты соответствующие изменения.

С высотой плотность воздуха падает, так как давление в большей степени падает, чем понижается температура воздуха. В стратосфере (**примерно с высоты 11 км и до 32 км**) температура почти постоянна, и поэтому плотность воздуха падает пропорционально уменьшению давления

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА

На характер обтекания самолета воздушным потоком и на величину сил, возникающих при взаимодействии частей самолета и воздушного потока, существенное влияние оказывают физические **свойства воздуха**: **инертность**, **вязкость**, **сжимаемость**.

**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**.

**Самолеты Як-52 и Як-55 летают на скоростях менее 450 км/ч**, при которых существенного изменения давления при обтекании самолета воздушным потоком не происходит и

## СЖИМАЕМОСТЬ ВОЗДУХА И СКОРОСТЬ ЗВУКА

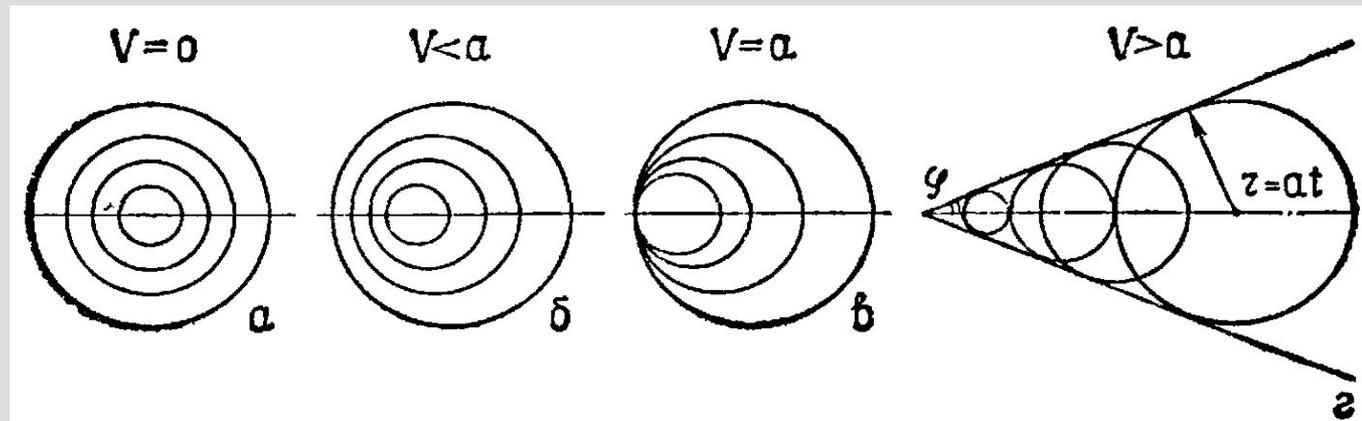
Помимо стационарных движений газовых потоков в аэродинамике изучаются и некоторые **нестационарные** процессы, например **образование и распространение** звуковых волн.

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**.

# СКАЧКИ УПЛОТНЕНИЯ

(часть 1)



**Распространение волн слабых возмущений и источников возмущений, движущихся с различными скоростями**

- Если источник возмущений **неподвижен**, то волны будут распространяться с **одинаковой скоростью во все стороны** в виде концентрических сфер, в центре которых находится источник возмущения. Каждое возмущение (звуковая волна) представляет собой местное уплотнение молекул воздуха, которое передается от одного слоя молекул к другому, удаляясь от источника возмущения.
- При **движении** точечного источника возмущения со **скоростью, меньшей** скорости звука, звуковые волны идут как вперед, так и назад. В результате сферические волны будут **смещены** в сторону, **обратную движению** источника возмущений, однако источник останется внутри сфер.

# СКАЧКИ УПЛОТНЕНИЯ

(часть 2)

- в) Если скорость движения точечного источника возмущений **сравняется со скоростью** звука, то возмущения, вызванные источником, не успевают уйти от источника и в месте нахождения источника возмущений в каждый данный момент происходит **наложение возмущений** друг на друга. Образовавшаяся в результате этих наложений фронтальная поверхность разделяет пространство на две области: **возмущенную** (**сзади** источника) и **невозмущенную** (**перед** источником).
- г) При движении точечного источника возмущений со скоростью, **превышающей** скорость движения звуковой волны (скорость звука), возмущения, им создаваемые, должны оставаться **позади** источника. Область, в которой распространяются малые возмущения от точечного источника возмущений, называется **конусом слабых возмущений**. Внутри конуса среда возмущена, вне конуса находится область, где возмущений от данного источника нет. Поверхность конуса служит естественной границей, разделяющей среду на две области - **возмущенную и невозмущенную**. Эту поверхность называют граничной волной слабых возмущений или границей возмущений. Граничные волны слабых возмущений образуются при движении со скоростью, превышающей скорость звука не только материальной точки, но и тонких тел с острой передней кромкой, а также при обтекании сверхзвуковым потоком поверхностей **крыла, фюзеляжа и других частей самолета**. Угол между границей возмущений и направлением движения источника возмущений называется углом **малых** возмущений.

# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА

## (УСТАНОВИВШИЙСЯ ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК – часть 1)

**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. То есть, если через определенные промежутки времени мы в одной и той же точке будем измерять скорость и другие параметры воздуха и при всех измерениях величины параметров одинаковы, то этот воздушный поток установившийся. Если же измеряемые величины **меняются**, то поток - **неустановившийся**. В аэродинамике рассматривают только установившийся воздушный поток.

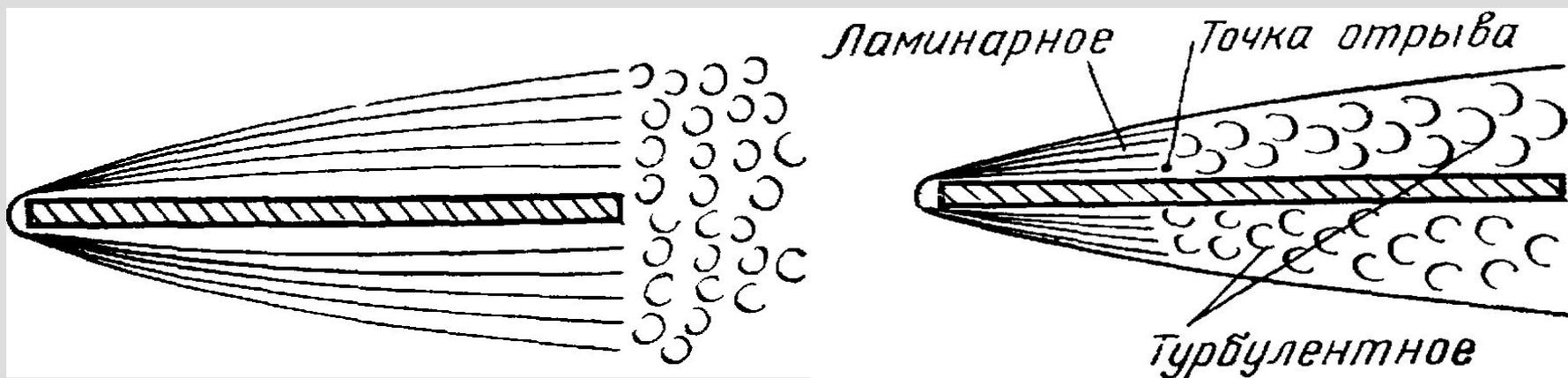
Основным понятием аэродинамики является понятие элементарной струйки воздуха.

**Элементарная струйка** - это мысленно выделенный поток (небольшой замкнутый контур в виде трубки), через боковую поверхность которого воздух протекать не может ни вовнутрь, ни наружу.

# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА

(Ламинарное и турбулентное течение – часть 2)

## Ламинарное и турбулентное течение



**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.

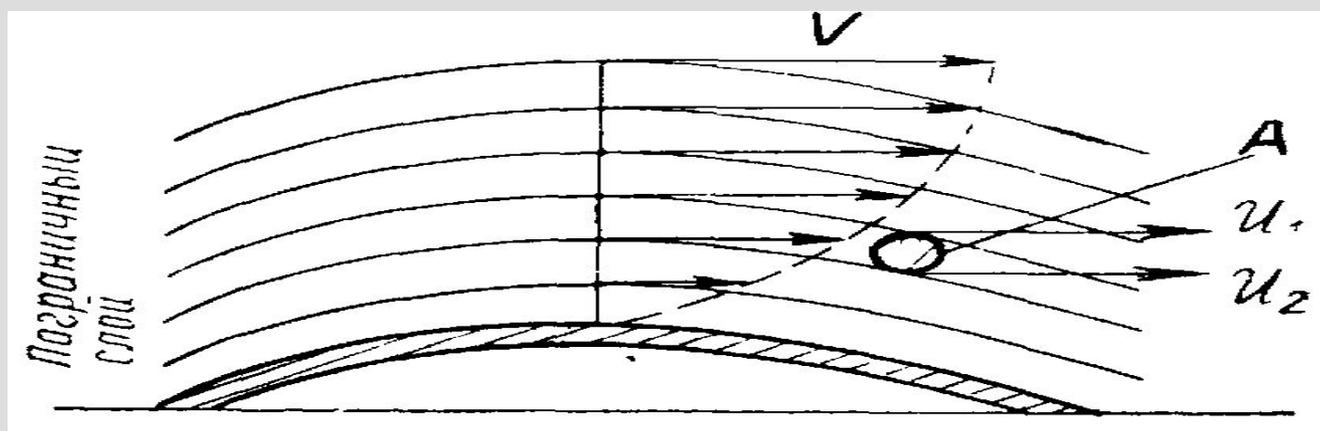
Образуется поток, который называется турбулентным, т. е. Беспорядочным.

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.

# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА

(*Пограничный слой* – часть 3)

*Обтекание тела воздушным потоком - торможение потока в пограничном слое*



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

При обтекании тела воздушным потоком 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.

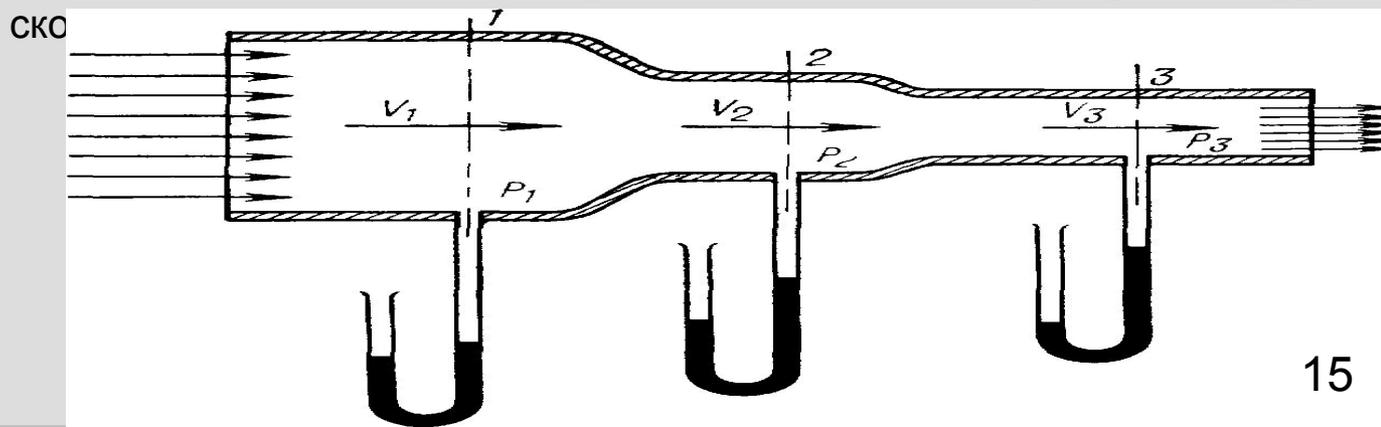
**Толщина** пограничного слоя измеряется в миллиметрах и зависит от *вязкости* и *давления* воздуха, от *профиля* тела, состояния его *поверхности* и *положения* тела в воздушном потоке. Толщина пограничного слоя постепенно увеличивается от передней к задней кромке. В пограничном слое характер движения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

# 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.

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

Рассмотрим трубу 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



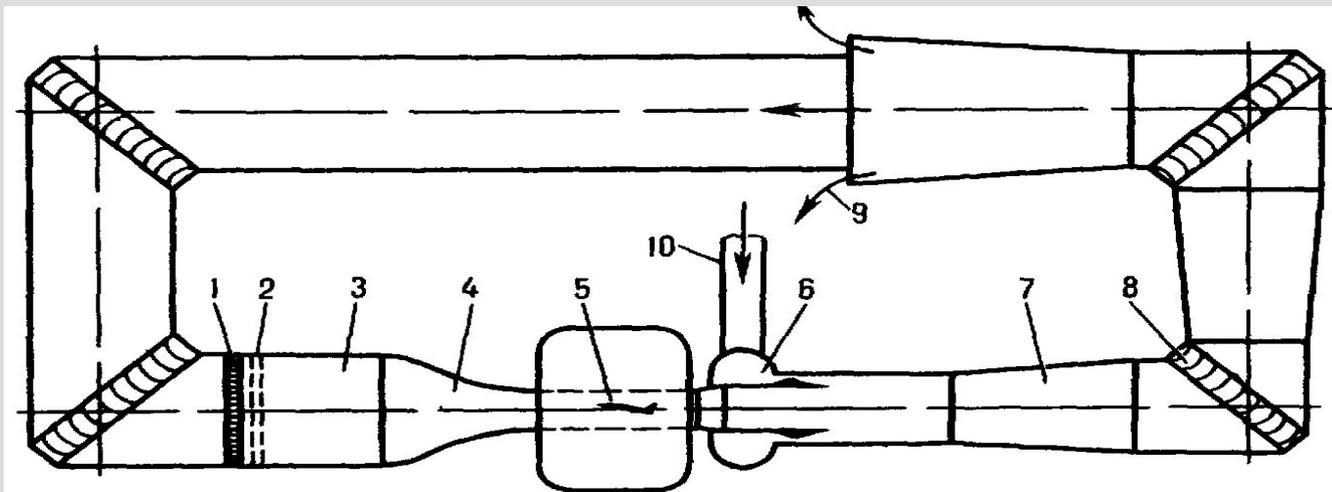
# АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ

Для **наглядности закона Бернулли** можно провести опыт. Взять два листка бумаги, держа параллельно друг другу на небольшом расстоянии, подуть в промежуток между ними. Листы сближаются. Причиной их сближения является то, что с внешней стороны листов давление атмосферное, а в промежутке между ними вследствие наличия скоростного напора воздуха давление уменьшилось и стало меньше атмосферного. Под действием разности давлений листки бумаги прогибаются вовнутрь.

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ

Экспериментальная установка для исследования явлений и процессов, сопровождающих обтекание тел потоком газа называется аэродинамической трубой. Принцип действия аэродинамических труб основан на принципе относительности Галилея: вместо движения тела в неподвижной среде изучается обтекание неподвижного тела потоком газа. В аэродинамических трубах экспериментально определяются действующие на ЛА аэродинамические силы и моменты исследуются распределения давления и температуры по его поверхности, наблюдается картина обтекания тела, изучается аэроупругость и т.д.

Схема баллонной трансзвуковой эжекторной аэродинамической трубы  
1 - хонейкомб 2 - сетки  
3 - форкамера 4 - конфузор  
5 - перфорированная рабочая часть с моделью 6 - эжектор  
7 - диффузор 8 - колесо с направляющими лопатками  
9 - выброс воздуха  
10 - подвод воздуха от баллонов



# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА

(повторение)

Характер взаимодействия воздуха и движущегося в нем тела зависит от физических его свойств: **инертности, вязкости, сжимаемости**.

- **Инертность**

Инертностью называется свойство воздуха сопротивляться изменению скорости. Мерой инертности является его масса

Чем больше плотность воздуха, тем большую инертность будет иметь единица объёма. Инертность принято характеризовать массовой плотностью.

- **Вязкость**

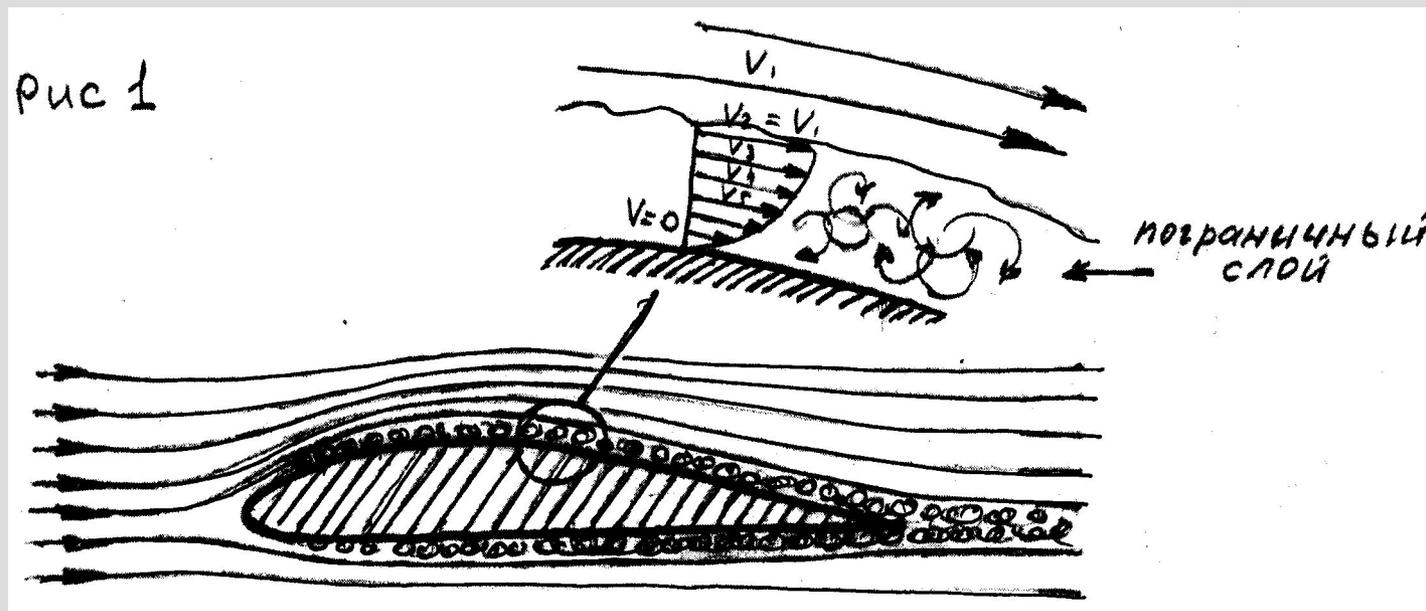
Вязкостью воздуха называют его способность сопротивляться сдвигу одних слоёв относительно других. Воздух весьма липкая среда и при обтекании твердого тела скорость воздуха изменяется в определенном слое от 0 на поверхности тела до скорости потока.

- **Сжимаемость**

Воздух — это газ, и он подвержен сжимаемости. Заметное влияние на обтекание тел

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА

(повторение)



На торможение “прилипшего” воздуха и преодоление вязкости воздуха затрачивается энергия, что является причиной возникновения силы трения о воздух.

Слой, в котором поток тормозится от своей скорости до нуля у поверхности тела называется пограничным слоем. Он невелик и имеет толщину от 1,5 до 3 % от длины обтекаемого тела.

На торможение “прилипшего” воздуха и преодоление вязкости воздуха затрачивается энергия, что является причиной возникновения силы трения о воздух.