

Лекция №2

Законы аэродинамики

Основные параметры и свойства воздуха в атмосфере

Давление :

$$p = dF / dS,$$

где p – давление, Па (1Па=1Н/м²);

F – сила, перпендикулярная поверхности элементарной площади, Н,

S – площадь поверхности элементарной площади, м².

Плотность :

$$\rho = m / W,$$

где ρ – плотность, кг/м³;

m – масса воздуха, кг,

W – объем, занимаемый воздухом, м³

Относительная плотность:

$$\rho = \rho_{\text{в}} / \rho_0,$$

где $\rho_{\text{в}}$ и ρ_0 – соответственно плотность на заданной высоте и на уровне Мирового океана.

Температура:

$$T = 273 + t.$$

Основные параметры и свойства воздуха в атмосфере

Уравнение Менделеева – Клапейрона: $pV = mRT / M$

где p – давление;

V – объем воздуха;

m – масса воздуха;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Дж/(моль К)}$;

T – абсолютная температура;

M – молярная масса воздуха (масса воздуха, взятого в количестве один моль).

Газовая постоянная: $R = C_p - C_v = C_v(k - 1),$

где C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении (для воздуха $C_p = 1000 \text{ Дж/(кг К)}$);

C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме (для воздуха $C_v = 716 \text{ Дж/(кг К)}$);

k – отношение теплоемкостей C_p / C_v . Таким образом, для воздуха $k = 1,41$.

Основные параметры и свойства воздуха в атмосфере

Сжимаемость характеризует свойство воздуха изменять свой объем и плотность при изменении давления и температуры

Упругость характеризует свойство воздуха возвращаться в исходное состояние после прекращения действия сил, вызвавших его деформацию

Вязкость – способность воздуха оказывать сопротивление относительному перемещению его слоев

Уравнение сформулировано Л. Эйлером в 1756г. применительно к движению струйки жидкости

Уравнение Л. Эйлера для струйки и потока идеальной
жидкости.

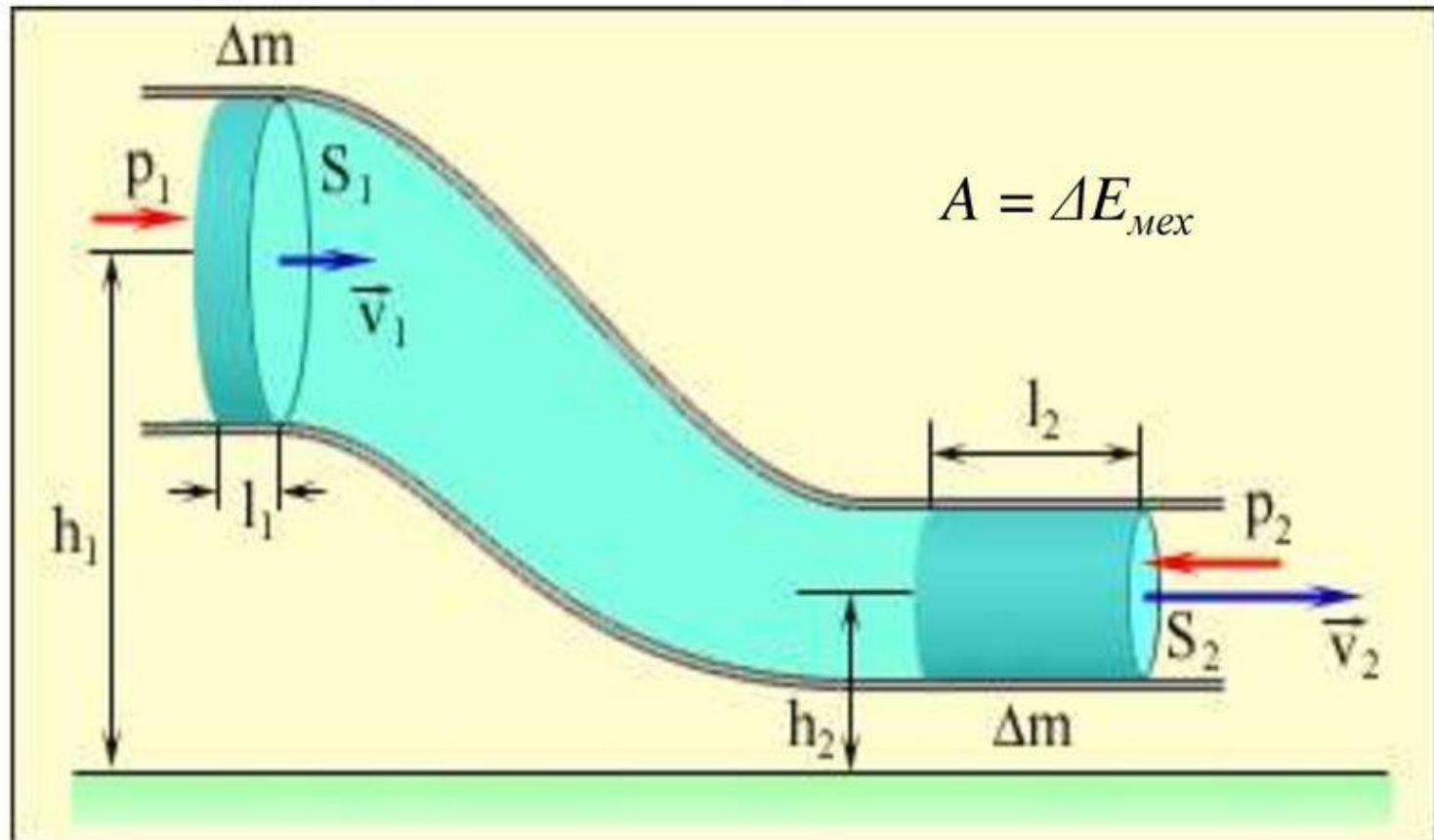
$$\begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{dV_x}{dt} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} &= \frac{dV_y}{dt} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{dV_z}{dt} \end{aligned}$$

←
Проекция
ускорени
я
массовых
сил на
соответс
в. оси

↓
Проекция
ускорения
поверхнос
т. сил на
соответст
в. оси

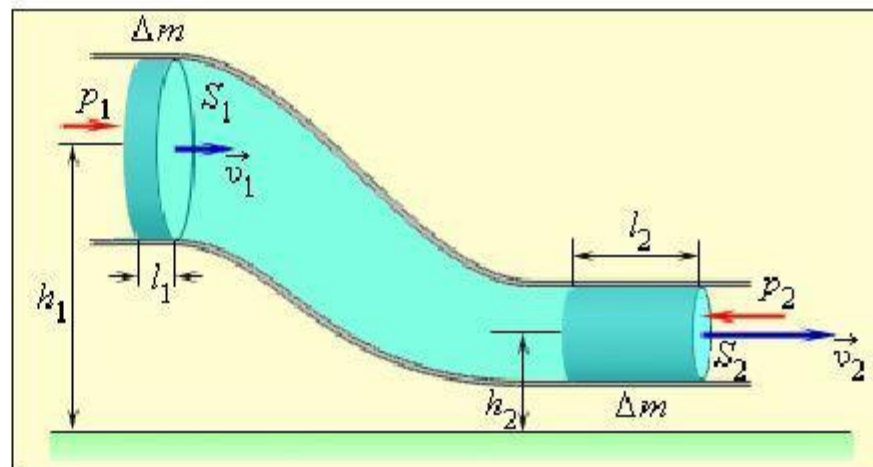
↘
Проекция
ускорения
самой
жидкости

Уравнение Бернулли. Распространенное явление, когда сечение и высота пролегания трубки с текущей жидкостью изменяются вдоль трубки. На рисунке показан такой случай.



Закон Бернулли является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной несжимаемой жидкости:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}$$



ρ — плотность жидкости,
 v - скорость потока,
 h - высота,
 p – давление,
 g - ускорение
свободного падения

Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока, из-за возрастания скорости (динамического давления) статическое давление падает.

Для горизонтальной трубы $h = 0$ и уравнение Бернулли принимает вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}$$



Даниил БЕРНУЛЛИ
(1700–1782)

Закон Бернулли

- ◆ **Проделайте опыт:**
возьмите полоску бумаги и дуйте вдоль ее верхней поверхности, при этом полоска поднимается вверх. Давление газа над полоской меньше давления снизу. Закон Бернулли относится не только к жидкости, но и к газу, если его объем не изменяется.



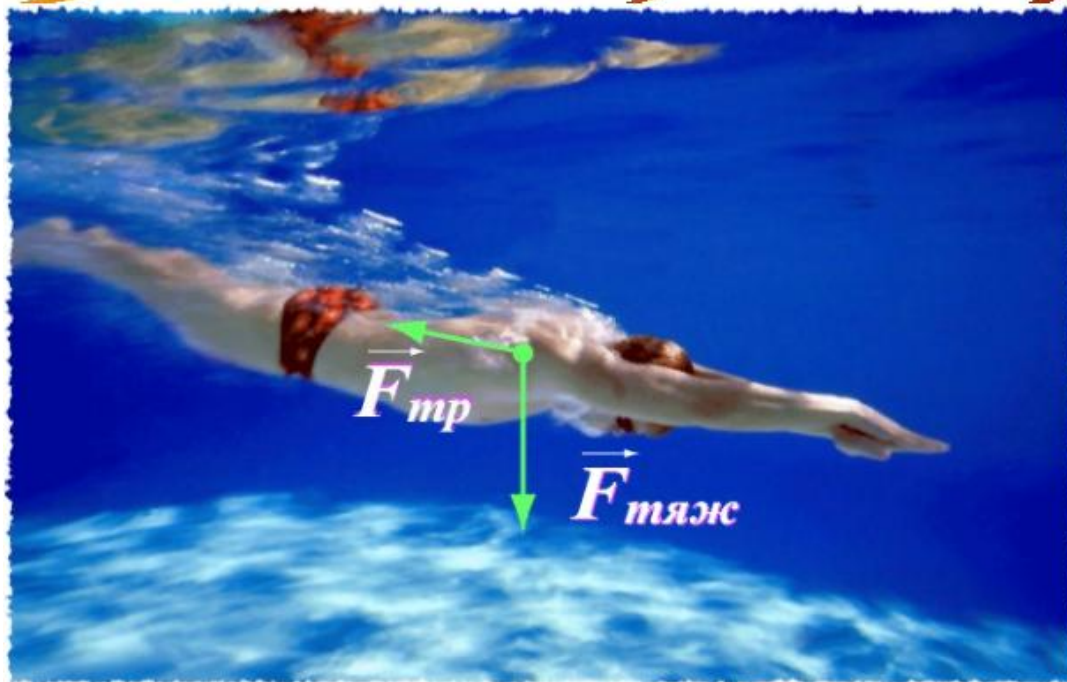
*Законы аэродинамики
являются теоретической
основой для изучения
процессов обтекания крыла и
летательного аппарата,
способов расчета
аэродинамических сил.*

Жидкое трение

При движении в жидкости или газе возникает **сила вязкого трения** (сила сопротивления)

При вязком трении нет трения покоя.

Сила вязкого трения значительно меньше силы сухого трения и также направлена в сторону, противоположную относительной скорости тела.



Зависимость от модуля скорости может быть

линейной $F_{сопр} = k \cdot v$ или
квадратичной $F_{сопр} = k \cdot v^2$.



Основной закон вязкого течения был установлен **Ньютоном** (1713)

$$F = \eta \frac{dv}{dx} \cdot S$$

**Уравнение
Ньютона**

Формулировка: сила внутреннего трения F между слоями движущейся жидкости прямо пропорциональна скорости сдвига $\frac{dv}{dx}$, площади поверхности соприкасающихся слоев S . Коэффициентом пропорциональности является коэффициент **вязкости η** .

Сила сопротивления

- **Сила сопротивления** – сила, действующая на тело при его поступательном движении в газе или жидкости. Она зависит от скорости $\mathbf{v}$ тела относительно среды, причем направлена противоположно вектору $\mathbf{v}$:

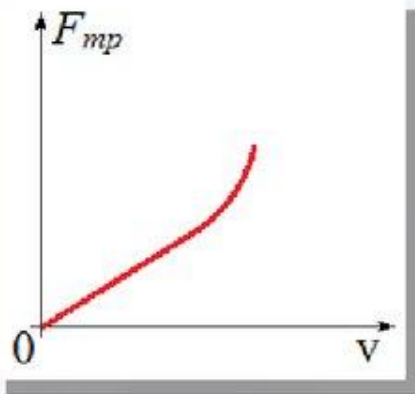
$$F_{\text{сопр}} = - \alpha v$$

- Здесь α – положительный коэффициент, характерный для данного тела и данной среды, зависящий, в общем случае, от скорости тела, однако при малых скоростях $\alpha \approx \text{const}$.
- При больших скоростях тела сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости тела:

$$F_{\text{сопр}} = - \beta v v$$

Вязкое трение

Помимо собственно силы трения, при движении вязкой среде возникают и силы сопротивления среды.



Зависимость силы трения
от скорости скольжения

При малых скоростях:

$$\vec{F}_{tr} = -k_1 \vec{v}$$

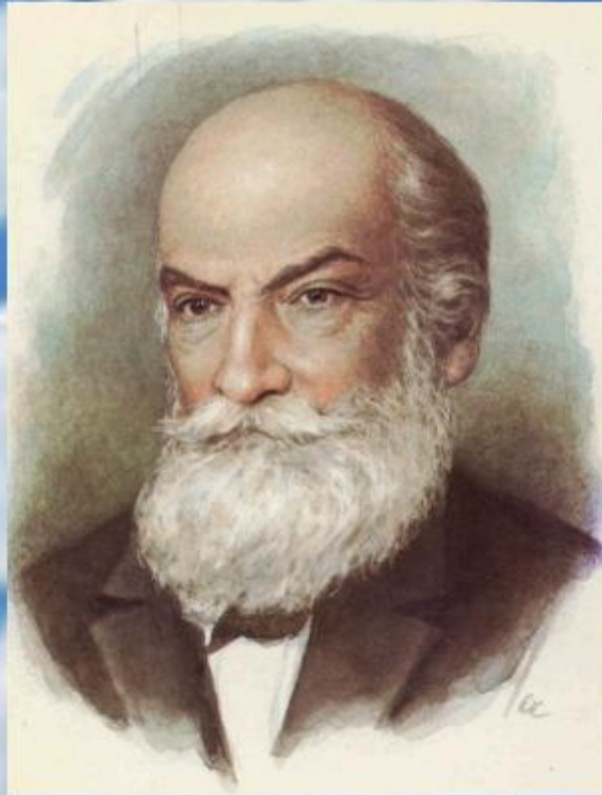
При больших скоростях:

$$\vec{F}_{tr} = -k_2 v^2 \vec{e}_v$$

Коэффициент k_1 зависит от формы и размеров тела, состояния его поверхности и от вязкости среды.

Коэффициент k_2 зависит от формы и размеров тела.

Научные исследования полёта



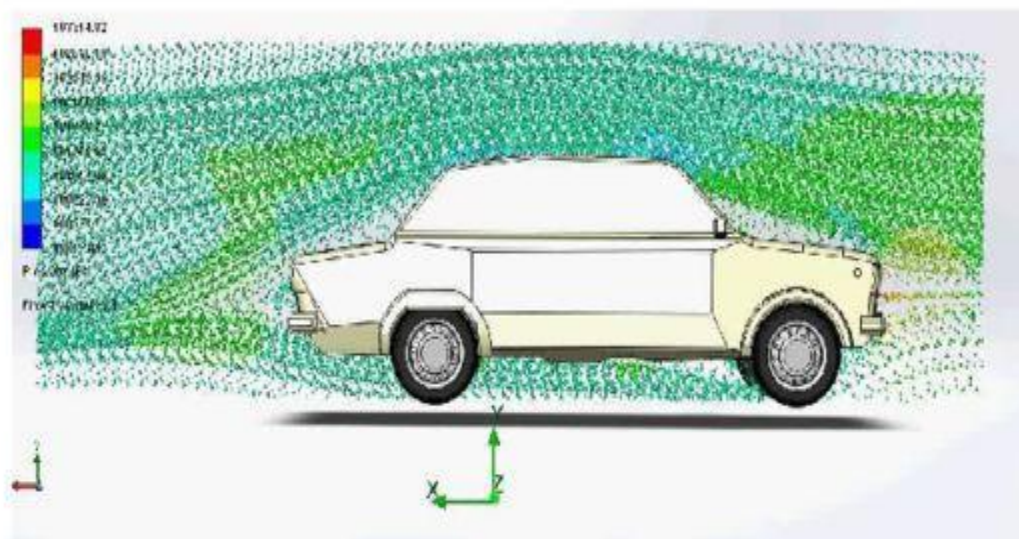
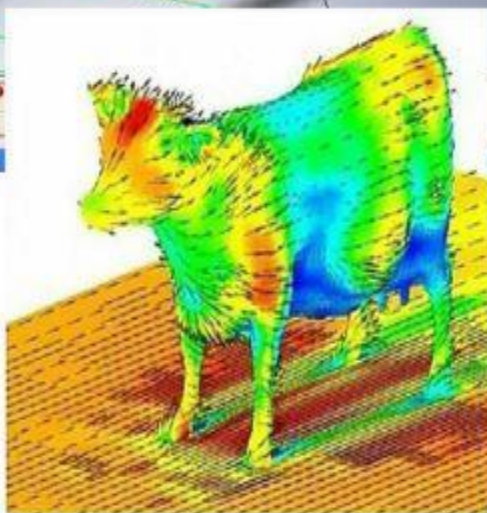
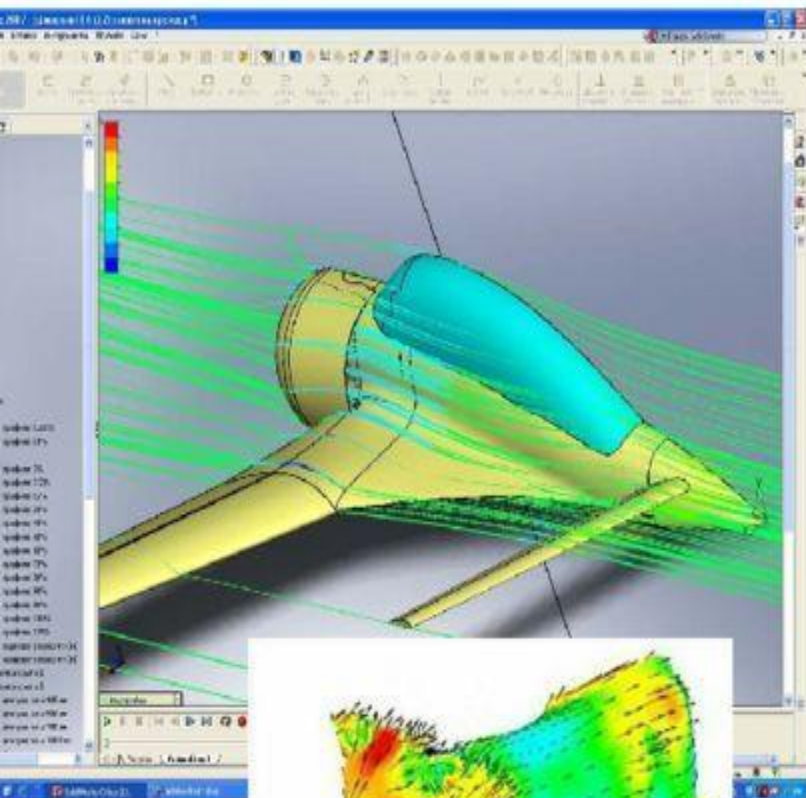
- **Аэродинамика** – наука, которая изучает движение воздуха и его взаимодействие с движущимися в нём телами.

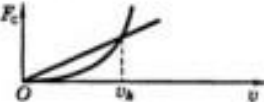
Н.Е Жуковский – создатель аэродинамики как науки. « Отец русской авиации ». Жуковский связал теоретическую аэродинамику с практикой авиации. В 1904 г открыл закон определяющий подъемную силу крыла самолета , определил основные профили крыльев и лопасти винта самолета , разработал вихревую теорию винта .

Аэродинамика

Аэродинамика - учение о движении воздуха и др. газов и о воздействии газов на обтекаемые ими тела.

Аэродинамика главным образом важна в авиастроении, автостроении и подобных областях. Однако, аэродинамические свойства есть у любых предметов, взаимодействующих с воздухом или иным газом. Даже у коровы.



Основные понятия гидро- и аэродинамики	Линии тока — линии, касательная к каждой точке которой указывает направление скорости потока. Стационарный поток — поток, при котором линии тока совпадают с траекториями отдельных частиц. Токовые трубки — поверхность, образованная линиями тока. Скорость жидкости (газа) во всех точках одного и того же сечения одинакова	
Модель	При стационарных течениях жидкости (и даже газы) можно считать несжимаемыми жидкостями, т. е. мы не пренебрегаем изменениями давлений, обусловленными изменениями степени сжатия, но пренебрегаем изменениями объема	
Уравнение неразрывности струи		$\Delta m = \text{const}$ $S_1 v_1 = S_2 v_2$
Уравнение Д. Бернулли (1738)		$\rho g h + \rho \frac{v^2}{2} + p = \text{const}$ $p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2)$
Реактивное движение		$\vec{F}_p = -\mu \vec{u}$
Движение тел в жидкостях и газах		
Соппротивление трения $F - r v$ Соппротивление давления $F - r^2 v^2$		При $v < v_k$ $F \sim v$ При $v > v_k$ $F \sim v^2$
Подъемная сила крыла самолета		R_y — подъемная сила R_x — сила лобового сопротивления

Вопросы для повторения:

1. Что называется давлением воздуха и какова его физическая сущность?
2. Каков физический смысл понятия «плотность воздуха»?
3. Какова зависимость между плотностью, давлением и температурой?
4. Для чего служит Стандартная атмосфера?
5. Какое уравнение устанавливает зависимость между скоростью и площадью поперечного сечения потока?
6. Какое уравнение устанавливает зависимость между давлением и скоростью потока?
7. В чём причина статического давления в струйке потока?
8. Что такое скоростной напор? От чего он зависит?
9. С какой целью изучают аэродинамические спектры обтекания?
10. Что такое ламинарное и турбулентное течения. В чём их отличие?
11. Как возникает отрыв пограничного слоя? К чему он приводит?
12. Для чего служит аэродинамическая труба?

ЗАКОНЫ АЭРОДИНАМИКИ

Скоростной автомобиль по своему внешнему виду очень отличается от обычного. Низкая посадка и обтекаемые линии корпуса скоростного автомобиля уменьшают сопротивление воздуха во время движения, он быстрее развивает высокие скорости и экономней расходует топливо.

ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Корпус скоростного автомобиля должен иметь минимальное аэродинамическое сопротивление. Разогнавшись до высокой скорости, автомобиль наталкивается на воздух, который стремится отбросить машину назад. Это сопротивление воздуха называется аэродинамическим, или лобовым, сопротивлением.

► Обтекаемая форма «Порше Кайенн S» снижает сопротивление воздуха.

Сиденье водителя расположено низко.



► В этом автомобиле сиденья установлены пыльные уплотнители. Это придает особый форму, которая захватывает воздух, обтекающий автомобиль. За автомобилем возникает область повышенного давления, которая как бы толкает машину вперед, помогая ей двигаться быстрее.



Воздушный поток



Сиденье

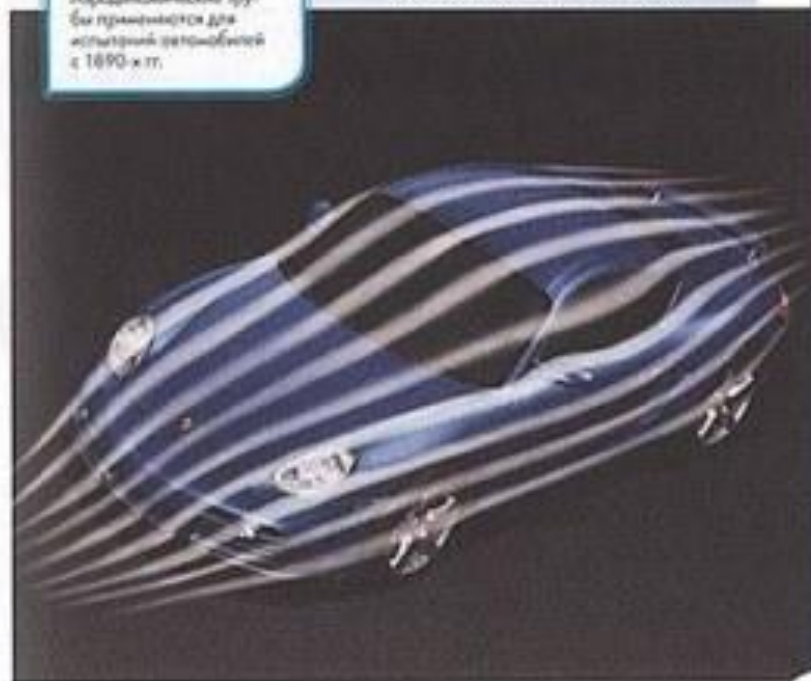
ИСПЫТАНИЯ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

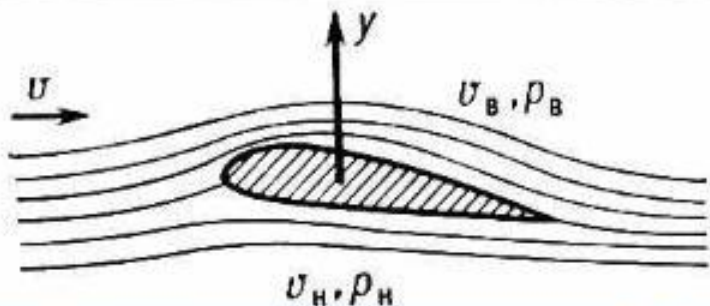
Для испытания конструкции автомобиля машину или ее макет помещают в аэродинамическую трубу. Это установка, через которую прогоняют воздух, измеряя параметры воздушных потоков, возникающих при столкновении воздуха с корпусом автомобиля. Воздух, как известно, прозрачен – поэтому, чтобы увидеть воздушные потоки, в воздух подмешивают дым, который трудно различить невооруженным взглядом.

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ?

Аэродинамическая труба применяется для испытаний автомобилей с 1890-х гг.

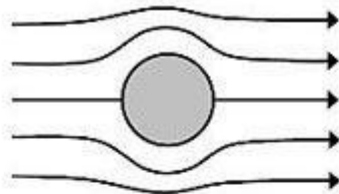
► Дым, подмешанный к воздуху, позволяет увидеть воздушные потоки, образующиеся в аэродинамической трубе.



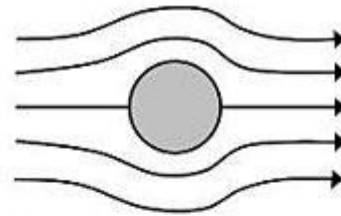


У крыла верхняя часть более выпуклая, чем нижняя, следовательно, верхним струйкам придётся пройти больший путь, чем нижним. Однако количество воздуха, набегающего на крыло и стекающего с него, одинаково. Значит, верхние струйки, чтобы не отставать от нижних, должны двигаться быстрее. Давление под крылом больше, чем над крылом. Эта разность давлений и создаёт аэродинамическую силу R , одной из составляющих которой является подъёмная сила F .

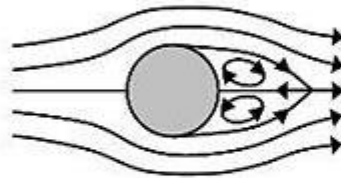
Подъёмная сила крыла



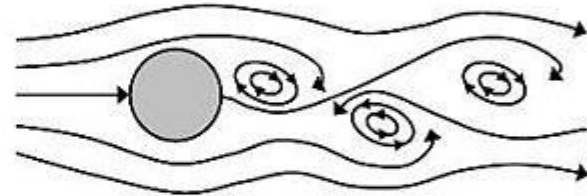
Inviscid flow: $Re = \infty$



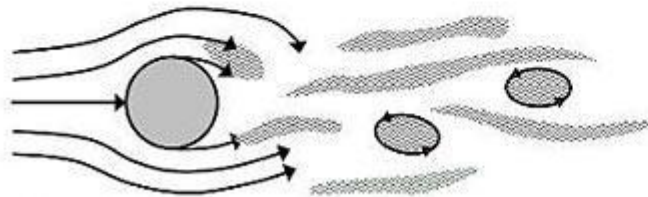
$Re \approx 0.01$



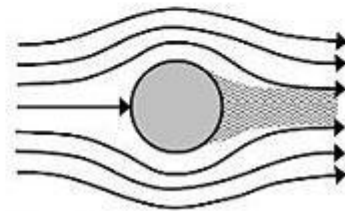
$Re \approx 20$



$Re \approx 100$

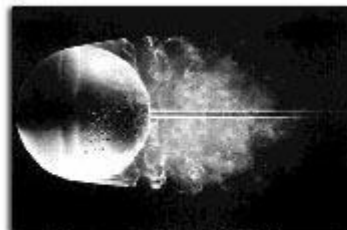


$Re \approx 10\,000$

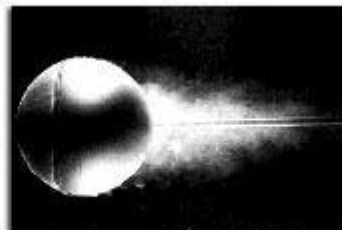


$Re \approx 10\,000\,000$

Тем не менее, отметим порядок величин числа Рейнольдса при переходе от ламинарного обтекания к турбулентному (10^2 — 10^4), а так же крайний случай турбулентности на рисунках ($3 \cdot 10^4$ — 10^6), когда обтекание, как ни странно, не сильно отличается от ламинарного.



Re = 15 000



Re = 30 000