

ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ

Состав воздуха

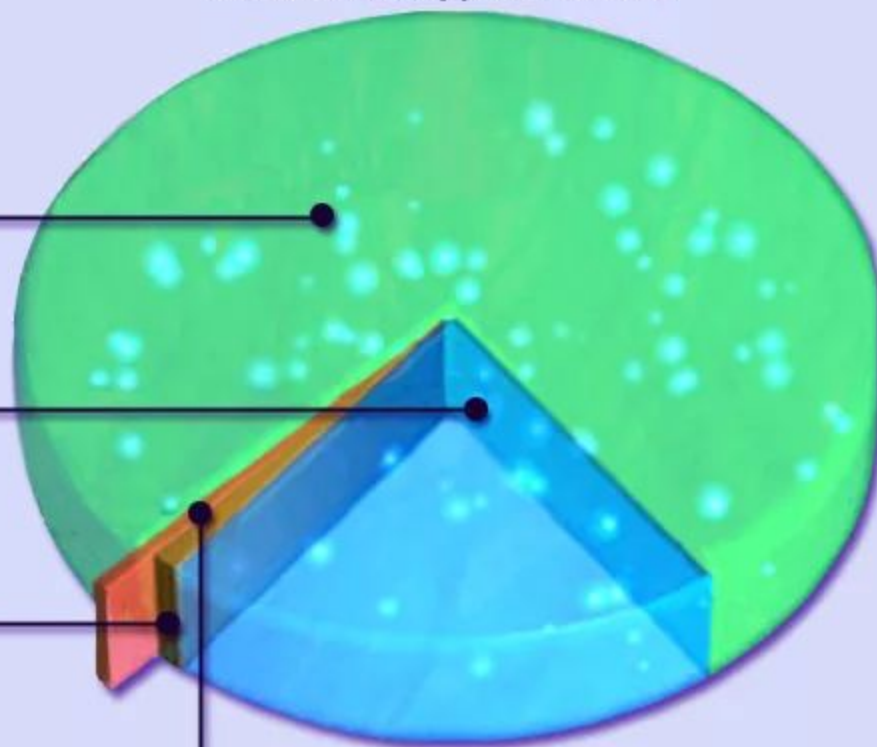
объемные доли газов

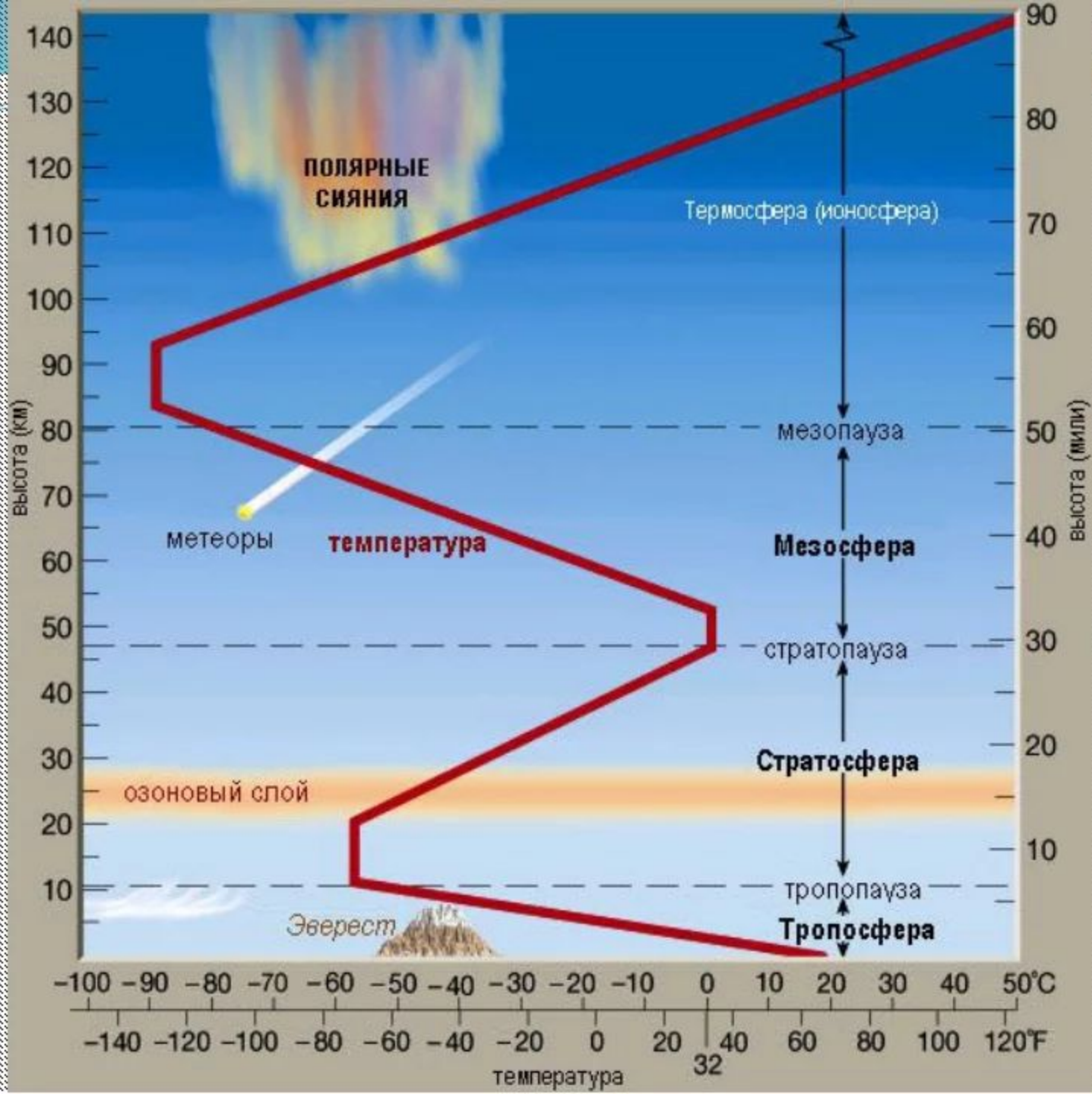
Азот 78,09 %

Кислород 20,95 %

Аргон 0,93 %

Углекислый газ 0,03%





Влажность воздуха – это величина, характеризующая содержание водяных паров в атмосфере

Абсолютная влажность воздуха - масса водяного пара, содержащаяся в единице объёма воздуха, то есть плотность содержащегося в воздухе водяного пара, [г/м³]

Относительная влажность воздуха - отношение давления пара к давлению насыщенного пара, то есть абсолютной влажности воздуха к максимальной, %



$$\rho = \frac{m}{V}$$

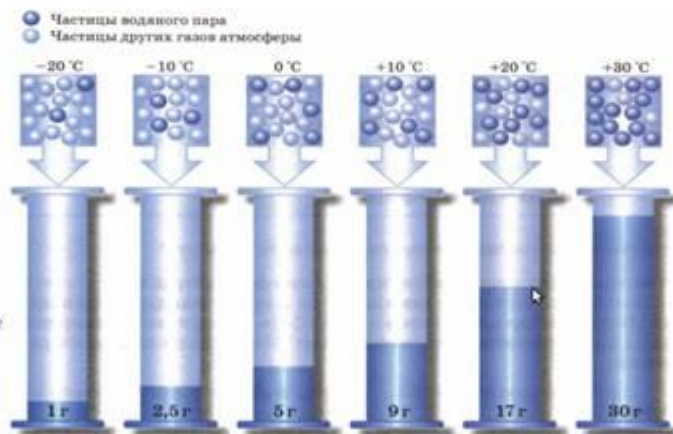
Точка росы - температура, при которой водяной пар становится насыщенным

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} 100\%$$

$$\varphi = \frac{p}{p_n} 100\%$$



Насыщенный пар - пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью

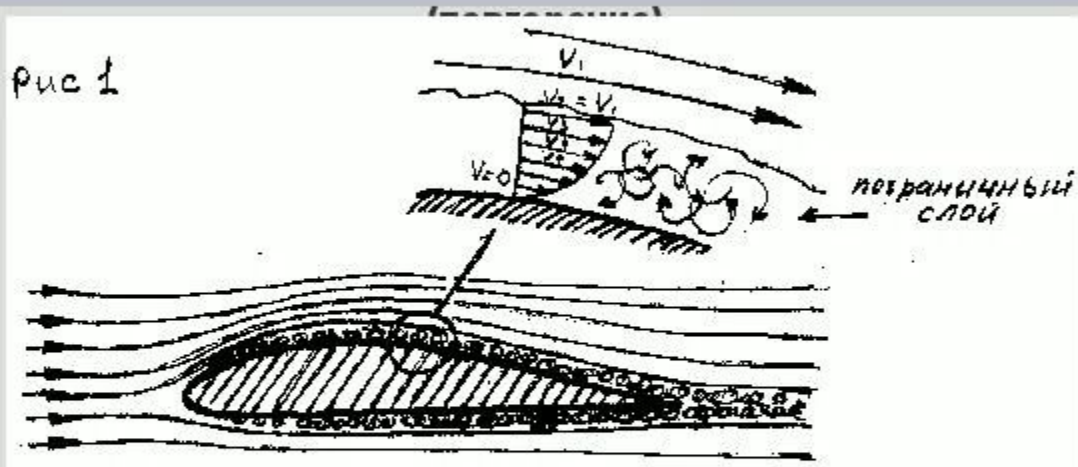


Психрометрическая таблица

Показание сухого термометра, °C	Разность показаний сухого и влажного термометров, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33

Физическая величина	Буквенное обозначение	Расчетная формула	Единицы измерения
Масса вещества	m	$m = m_0 \cdot N$	КГ
Масса молекулы	m_0	$m_0 = \frac{M}{N_A}$	КГ
Количество вещества	ν	$\nu = \frac{m}{M} \quad \nu = \frac{N}{N_A}$	МОЛЬ
Постоянная Авогадро	N_A	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$	МОЛЬ ⁻¹
Число молекул в веществе	N	$N = N_A \cdot \frac{m}{M}$	
Молекулярная масса	M_r	По периодической таблице Менделеева	а.е.м.
Молярная масса	M	$M = M_r \cdot 10^{-3}$	КГ/МОЛЬ

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА



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.

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.

Температура воздуха

Основной источник тепла на Земле — Солнце

Изменение температуры связано с вращением Земли вокруг собственной оси.

Наивысший показатель температуры воздуха — в 14 часов, наименьший — за час до рассвета.

Суточная амплитуда — разность между самой высокой и самой низкой температурой воздуха за сутки.



Давление воздуха убывает с высотой по закону:

$$P = P_0 \cdot a^{-k \cdot h}, \text{ где}$$

P – давление на высоте h ;
 P_0 - давление на уровне моря;
 a – некоторые постоянные.

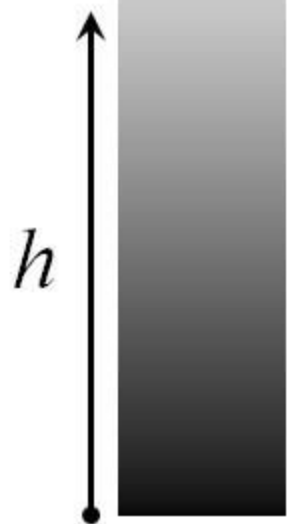


Как изменяется давление воздуха с высотой ?

Ответ: уменьшается. А почему?

Ответ: газ притягивается к Земле.

По какому закону уменьшается давление с высотой?



$$p(h) = p(0) \cdot e^{-\frac{\mu g}{RT} h},$$

где $p(h)$ – давление на высоте h ,

$p(0)$ – давление на уровне моря,

g – ускорение свободного падения,

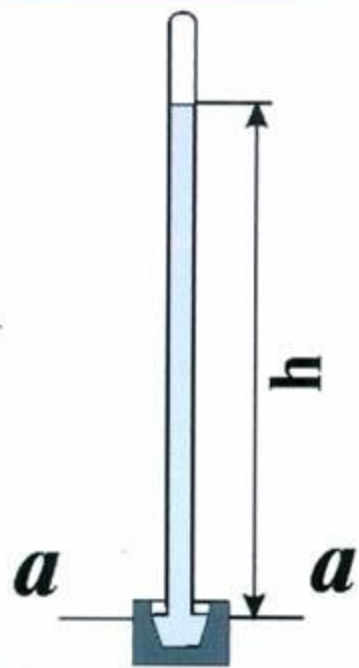
μ – молярная масса,

R – газовая постоянная,

T – абсолютная температура

АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Опыт Торричелли



$$p = \rho_{\text{рт}} g h$$

$$\rho_{\text{рт}} = 13600 \text{ кг/м}^3$$

плотность ртути

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$h - \text{высота столба}$$

ртути

Нормальное
атмосферное
давление -
760 мм.рт.ст.

$$P = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}$$

Давление по международной системе единиц СИ определяется по формуле:

$$P = \frac{P}{S},$$

где P - давление, кгс/см²;

p - сила, с которой давит 1 м³ воздуха;

S - площадь, см².

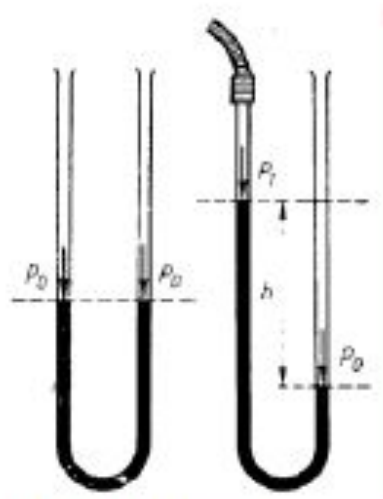


Рис. 3 Манометр

Давление в 1 кгс/см² равнозначно столбу ртути высотой 735,6 мм и называется технической атмосферой. Перевод давления из размерности мм рт. ст. в кгс/см² производится по формуле:

$$P = \frac{B}{735,6},$$

где B - барометрическое давление.

В физике под барометрическим давлением 1 атм. подразумевается давление воздуха, равное 1,0332 кгс/см² или стандартному барометрическому давлению 760 мм рт. ст.

Температура воздуха	Плотность воздуха
°C	кг/м ³
-20	1,395
0	1,293
5	1,269
10	1,247
15	1,225
20	1,204
25	1,184
30	1,165

ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА ОТ ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

При изменении давления и температуры изменяется плотность воздуха. Плотность воздуха (в кгс·с²·м⁻⁴) непосредственно не измеряется, а определяется по формуле:

$$\rho = 0,0473 \frac{B}{T},$$

где B - барометрическое давление, мм рт. ст.;

Задача 1 Определить массовую плотность воздуха на уровне моря, если барометрическое давление $B = 800$ мм рт. ст., а температура воздуха $t = - 23^{\circ}\text{C}$.

Решение.
$$\rho = 0,0473 \frac{B}{T} = \frac{0,0473 * 800}{273 - 23} = 0,151 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4,$$

Массовая плотность больше стандартной, так как барометрическое давление больше стандартного, а температура ниже стандартной.

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

- температура - 18-20⁰
- влажность – 40-60%
- давление – 755 мм. рт. ст.
- скорость движения воздуха – 0,2-0,4 м/с (в помещении)

Основные физические свойства жидкости

- - Инертность (плотностью)
- - Сжимаемость
- - Вязкость

Инертность характеризуется плотностью

Обратная величина плотности удельный объем. Связанная с плотностью величина называется удельный вес.

$$\gamma = \frac{G}{W}$$

$$\gamma = \rho g$$

Плотность зависит от температуры.

Коэффициент температурного расширения β_t

$$\beta_t = \frac{1}{W} \cdot \frac{W_0 - W_1}{t_2 - t_1}$$

521. Какова плотность сжатого воздуха при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в камере колеса автомобиля, если он находится под давлением $0,17\text{ МПа}$ (избыточным над атмосферным)?

Решение. Из уравнения состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M}RT,$$

где $\rho = m/V$, находим:

$$\rho = \frac{pM}{RT} = \frac{(p_a + \Delta p)M}{RT}.$$

Вычисления:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{(10^5 \text{ Па} + 1,7 \cdot 10^5 \text{ Па}) \cdot 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 273 \text{ К}} = \\ &= 3,45 \text{ кг/м}^3,\end{aligned}$$

где $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ — молярная масса воздуха.

Ответ: $\rho = 3,45 \text{ кг/м}^3$.

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. Количественно сжимаемость оценивается отношением изменения плотности $\Delta\rho$ к

изменению давления ΔP , т. е. их относительной величиной $\frac{\Delta\rho}{\Delta P}$. Это отношение будет являться мерой

сжимаемости. Чем больше отношение $\frac{\Delta\rho}{\Delta P}$, тем больше сжимаем этот газ (или воздух).

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 - скоростью распространения этих возмущений.

УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ СТРУИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Уравнение неразрывности струи воздушного потока (постоянства расхода воздуха) - это уравнение аэродинамики, вытекающее из основных законов физики - сохранения массы и инерции - и устанавливающее взаимосвязь между плотностью, скоростью и площадью поперечного сечения струи воздушного потока.

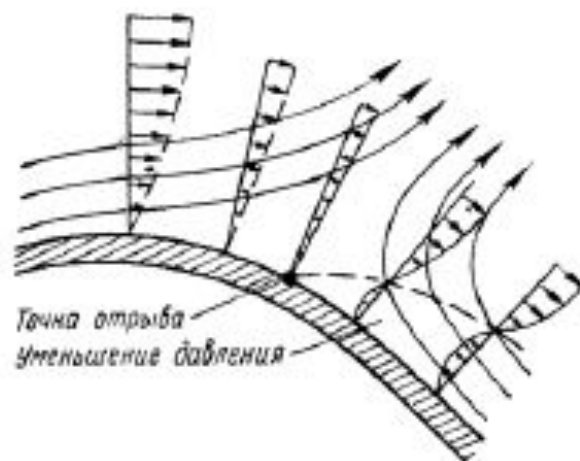


Рис. 8 Течение в пограничном слое вблизи точки отрыва

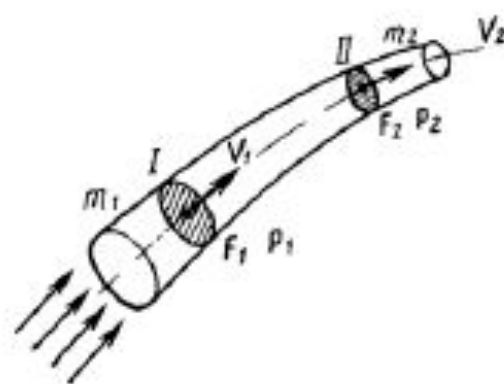


Рис. 9 Пояснение к закону неразрывности струи воздушного потока

Это уравнение для любого сечения струйки воздуха пишется следующим образом:

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

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.

Для наглядности закона Бернулли можно провести опыт. Взять два листка бумаги, держа параллельно друг другу на небольшом расстоянии, подуть в промежуток между ними.

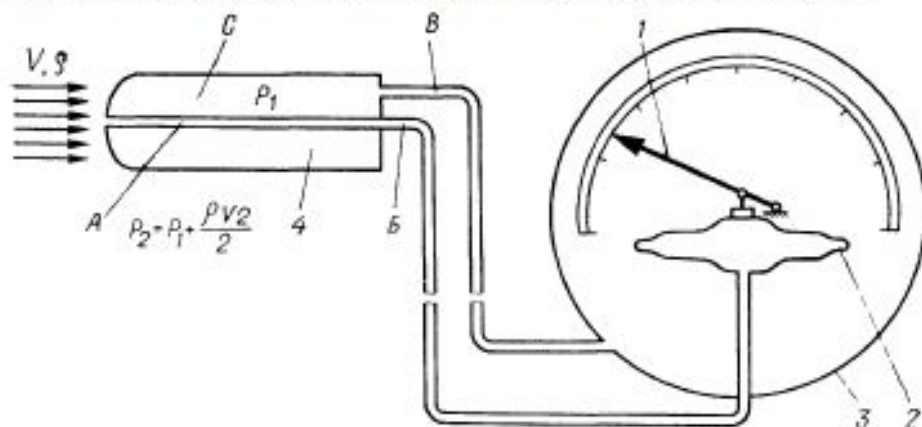


Рис. 11 Измерение скорости воздушного потока

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

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

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.

Аэродинамические трубы в зависимости от диапазона чисел Маха M разделяются на дозвуковые ($M=0,15-0,7$), трансзвуковые ($M=0,7-1,3$), сверхзвуковые ($M=1,3-5$) и гиперзвуковые ($M=5-25$), по принципу действия - на компрессорные (непрерывного действия), в которых поток воздуха создается спец компрессором, и баллонные с повышенным давлением, по компоновке контура - на замкнутые и незамкнутые.

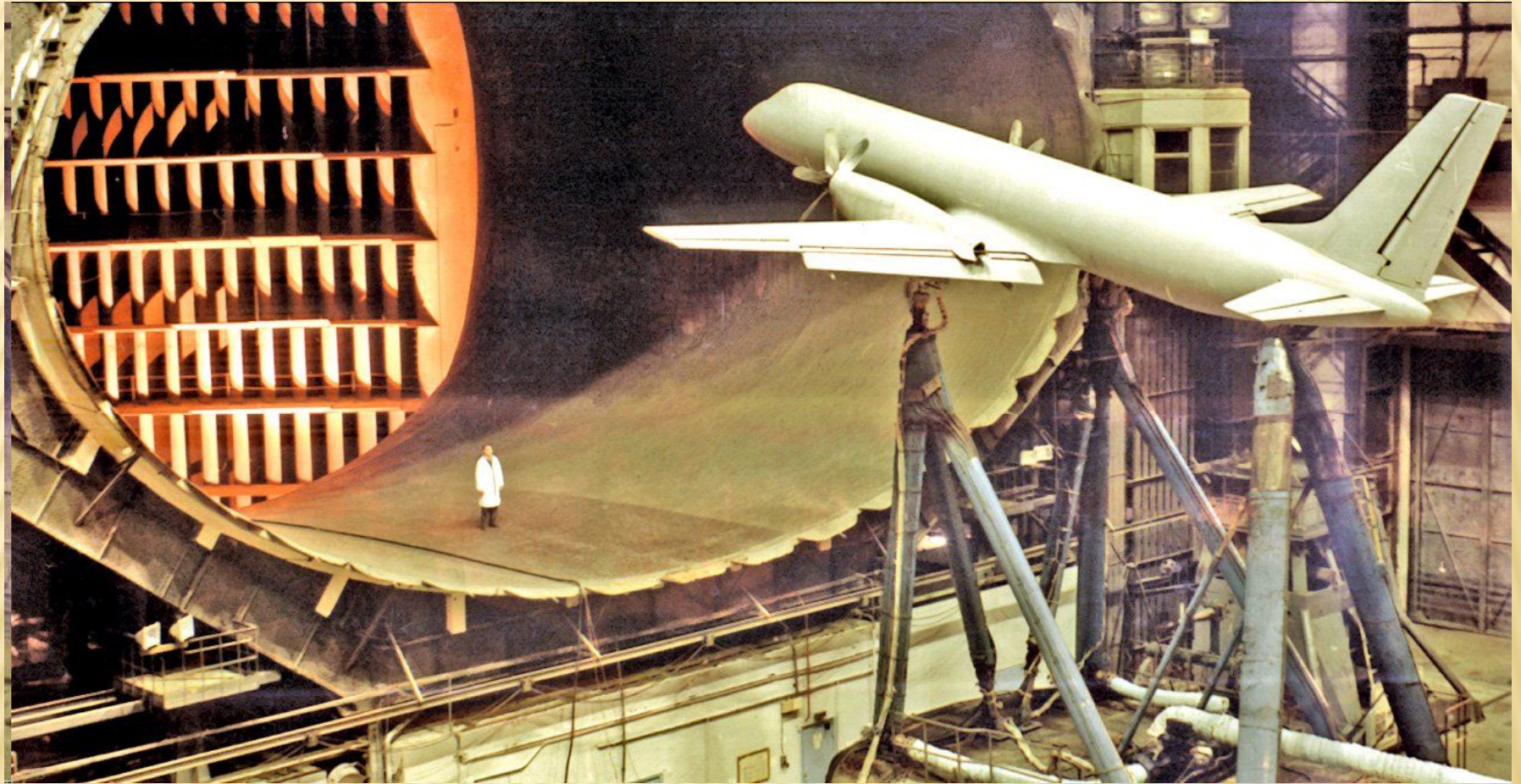
Компрессорные трубы имеют высокий КПД, они удобны в работе, но требуют создания уникальных компрессоров с большими расходами газа и большой мощности. Баллонные аэродинамические трубы по сравнению с компрессорными менее экономичны, поскольку при дросселировании газа часть энергии теряется. Кроме того, продолжительность работы баллонных аэродинамических труб ограничена запасом газа в баллонах и составляет для различных аэродинамических труб от десятков секунд до несколько минут.

Широкое распространение баллонных аэродинамических труб обусловлено тем, что они проще по конструкции а мощности компрессоров, необходимые для наполнения баллонов, относительно малы. В аэродинамических трубах с замкнутым контуром используется значительная часть кинетической энергии, оставшейся в газовом потоке после его прохождения через рабочую область, что повышает КПД трубы. При этом, однако, приходится увеличивать общие размеры установки.

В дозвуковых аэродинамических трубах исследуются аэродинамические характеристики дозвуковых самолетов вертолетов а также характеристики сверхзвуковых самолетов на взлетно-посадочных режимах. Кроме того, они используются для изучения обтекания автомобилей и др. наземных транспортных средств, зданий, монументов, мостов и др. объектов. На рис показана схема дозвуковой аэродинамической трубы с замкнутым контуром.













ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

При обтекании твердого тела воздушный поток подвергается деформации, что приводит к изменению скорости, давления, температуры и плотности в струйках потока. Таким образом, около поверхности обтекаемого тела создается область переменных скоростей и давлений воздуха. Наличие различных по величине давлений у поверхности твердого тела приводит к возникновению аэродинамических сил и моментов. Распределение этих сил зависит от характера обтекания тела, его положения в потоке, конфигурации тела. Для изучения физической картины обтекания твердых тел применяются различные способы показа видимой картины обтекания тела. Видимую картину обтекания тел воздушным потоком принято называть *аэродинамическим спектром*.

Для получения аэродинамических спектров применяют такие приборы, как дымканалы (Рис. 1), используют шелковинки, оптические меры исследования (для сверхзвуковых потоков) и др.

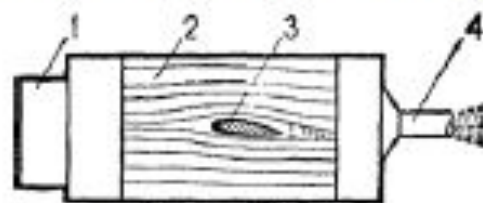


Рис. 1 Дымканал

1 - источник дыма; 2 - струйки дыма; 3 - обтекаемое тело; 4 - вентилятор

В дымканале аэродинамический спектр создается струйками дыма, выпускаемыми из специального дымоуловителя в поток воздуха, обтекающий тело.

Сущность способа с использованием шелковинки состоит в том, что в интересующих местах на поверхность обтекаемого тела наклеиваются специальные шелковинки, которые при обдуве тела располагаются вдоль обтекающих тело струек. По положению шелковинки судят о характере движения потока вблизи поверхности тела.

Наибольшая деформация струек наблюдается там, где тело имеет наибольшую величину искривления поверхности тела (точка К). В районе этой точки струйки поджимаются, поперечное сечение их уменьшается. Нижняя, менее искривленная поверхность мало влияет на характер обтекания. Здесь имеет место так называемое несимметричное обтекание. При обтекании воздушным потоком симметричных (и несимметричных) удобообтекаемых тел, помещенных под некоторым углом α к вектору скорости невозмущенного потока (Рис. 5), также будем иметь картину несимметричного обтекания и получим аэродинамический спектр, аналогичный тому, что получается при обтекании несимметричного удобообтекаемого тела (см. Рис. 4).

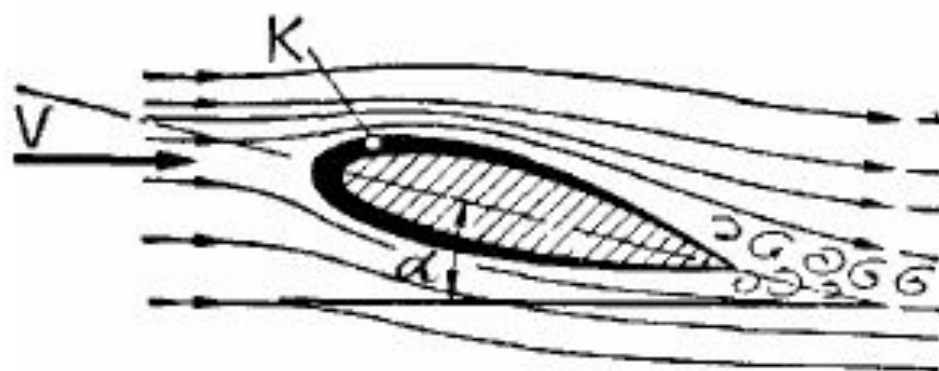


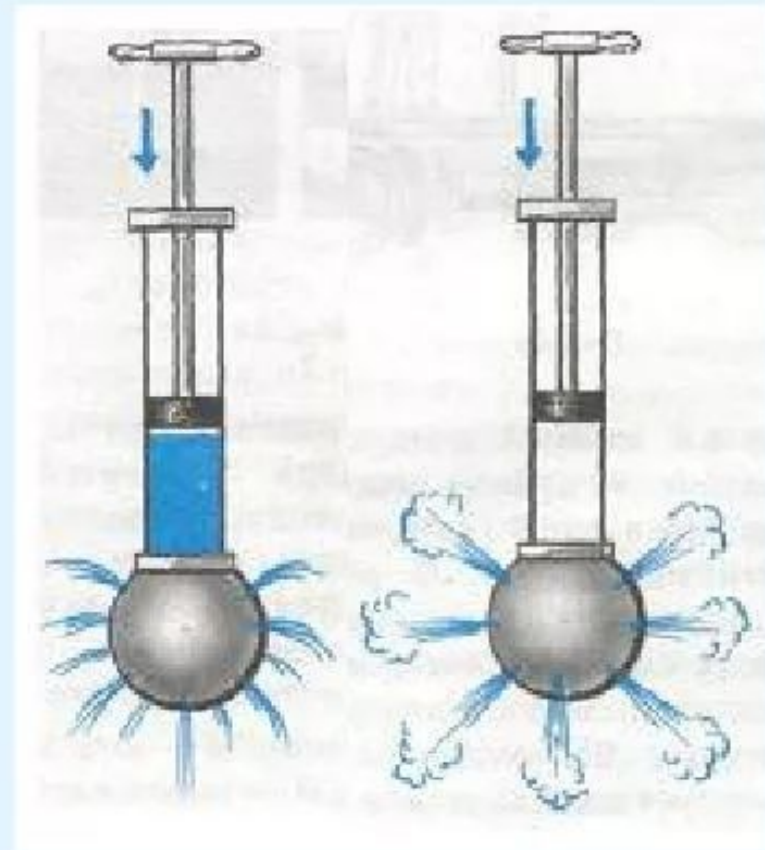
Рис. 5 Аэродинамический спектр удобообтекаемого тела (профиля крыла), помещенного в поток под углом α

На верхней поверхности тела, в месте наибольшего поджатия струек, согласно закону неразрывности струй будет наблюдать местное увеличение скорости потока и, следовательно, уменьшение давления. На нижней поверхности деформация потока будет меньше и, следовательно, меньше изменение скорости и давления.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ПОНЯТИЯ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТЕЙ

Закон Паскаля

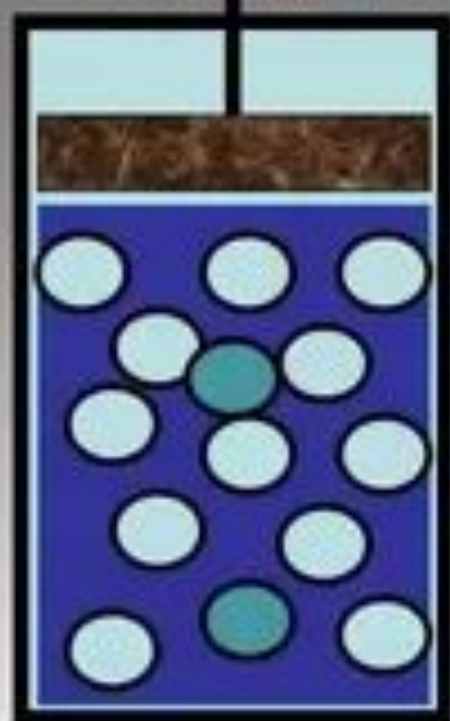
Давление,
производимое на
жидкость или газ
передается в
любую точку
одинаково во всех
направлениях.



Закон Паскаля



о передаче внешнего давления жидкостями и газами



Факты:

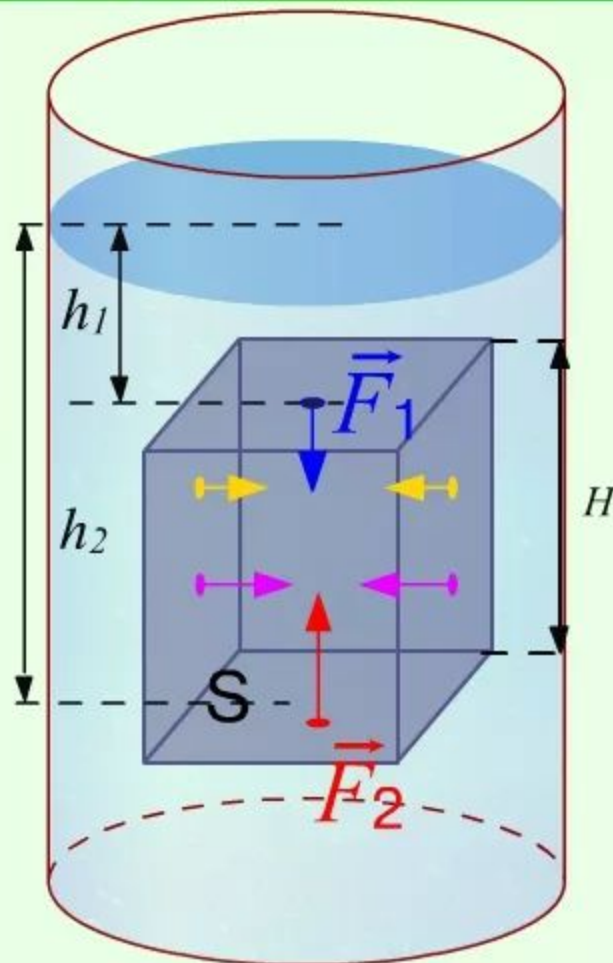


1. **Текучесть** жидкостей объясняется особенностями их молекулярного строения и большой **подвижностью** молекул.
2. Жидкости сохраняют **объем** и принимают **форму** сосуда.
3. Жидкости и газы могут находиться в состоянии **равновесия** или быть в движении.
4. Когда внешние силы сжимают жидкость в замкнутом сосуде, то молекулы жидкости упруго взаимно отталкиваются и **внутри жидкости возникает давление.**



Вывод закона Архимеда

Сила Архимеда



Вывод закона Архимеда:

1) Силы гидростатического давления на боковые поверхности куба равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\Sigma F_{\text{бок}} = 0$$

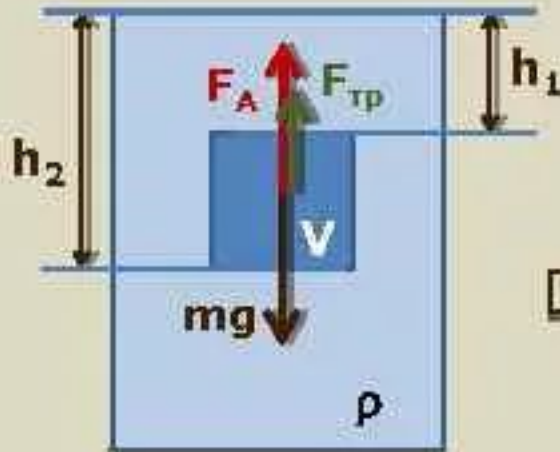
2) Сила гидростатического давления на нижнюю грань больше силы гидростатического давления на верхнюю грань:

$$F_2 = \rho_{\text{ж}} g h_2 \cdot S > F_1 = \rho_{\text{ж}} g h_1$$

3) Выталкивающая сила равна разности этих сил и направлена вверх:

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g (h_2 - h_1) \cdot S = \rho_{\text{ж}} g V$$

Закон Архимеда



$$P = \rho gh$$



$F_{\text{давл}}$
на нижние слои

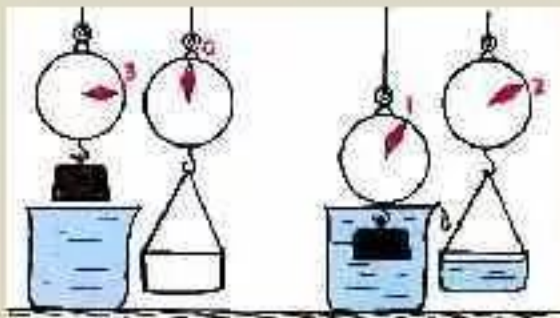


$F_{\text{давл}}$
на верхние слои

закон Архимеда

на тело, погруженное в жидкость (или газ), со стороны жидкости (газа) действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости (газа)

$$F_A = \rho g V$$



$$P_1 = \rho gh_1$$



$$\Delta P = \rho g (h_2 - h_1)$$

$$P_2 = \rho gh_2$$

$$\Delta F = \Delta P S = \rho g V$$

В состоянии невесомости F_A НЕ существует

1. $P_{\text{тела}} = F_A$

тело плавает
внутри жидкости

2. $P_{\text{тела}} > F_A$

тело тонет

3. $P_{\text{тела}} < F_A$

тело
всплывает

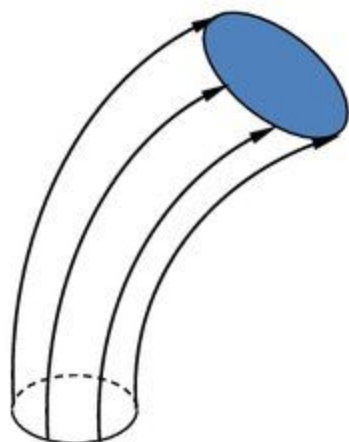
$$F_A - P_{\text{тела}} = F_{\text{подъемная}}$$

плоты, суда,
воздушные шары
и др.

Течение жидкости

Трубка тока – часть пространства, ограниченная линиями тока.

Текущая жидкость называется **ПОТОКОМ**.



КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА

Сечение S – площадка, перпендикулярная к направлению течения жидкости, $[m^2]$.

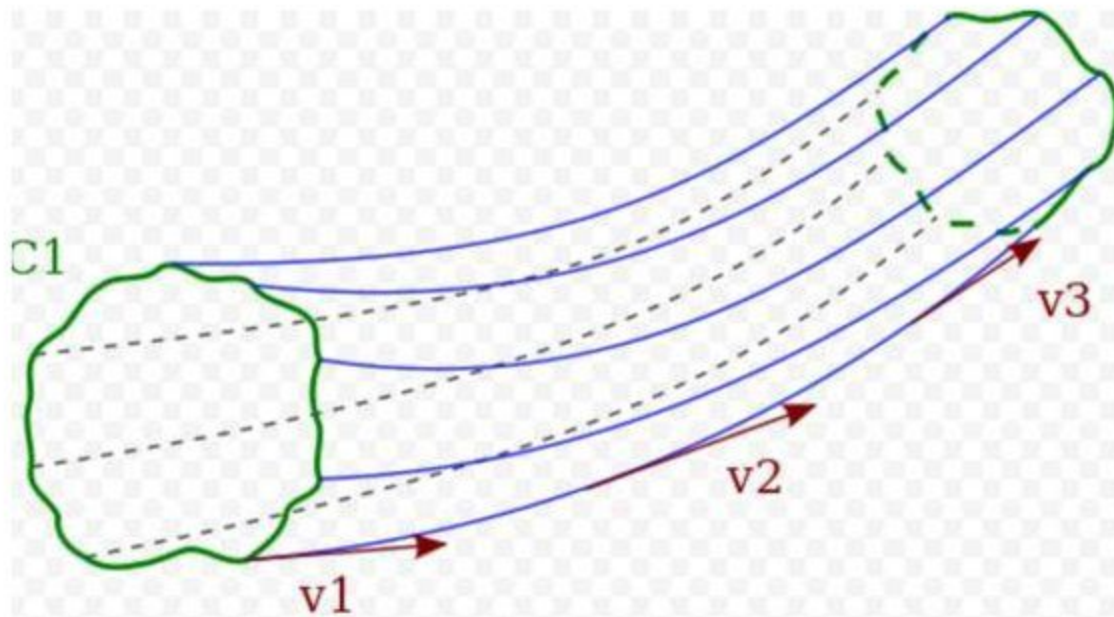
Объемный расход $Q = V/t$ – отношение объема, протекающего через площадь сечения, ко времени её протекания, $[m^3/c]$.

Массовый расход $M = m/t$ – отношение массы жидкости, протекающей через сечение, ко времени её

Течение жидкости

Течением называется перемещение условных частиц или микрообъемов жидкости относительно друг друга и тела отсчета.

Линии тока – такие линии, касательные которых в любой точке определяют направление скорости частиц жидкости.



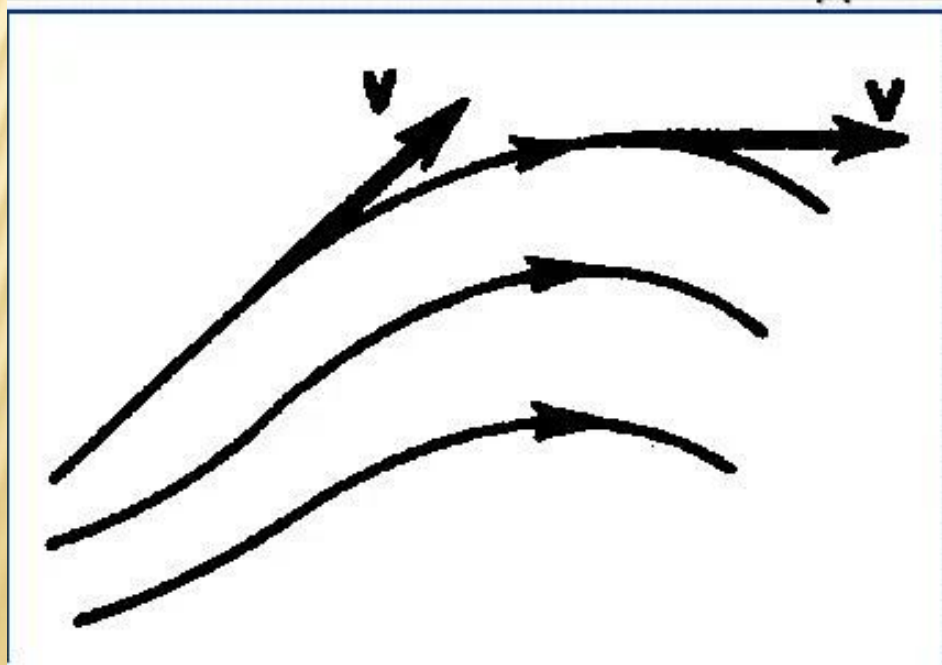
Для стационарного потока линии тока совпадают с траекториями частиц жидкости.

УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ

Движение жидкостей называется **течением**.

Совокупность частиц движущейся жидкости - **поток**.

Графически движение жидкостей изображается с помощью **линий тока**, которые проводятся так, что касательные к ним совпадают по направлению с



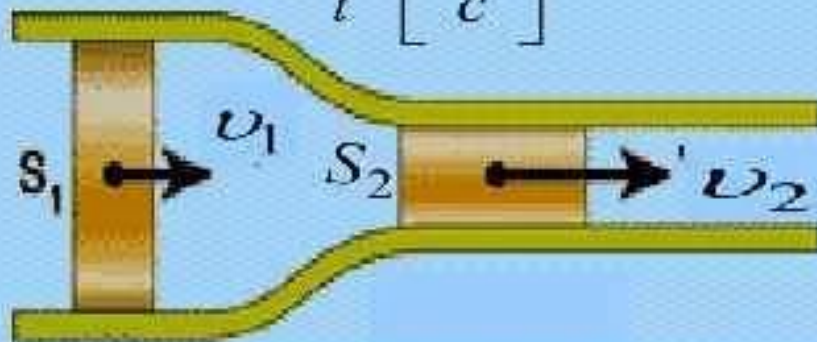
вектором скорости жидкости в соответствующих точках пространства.

СКОРОСТЬ ЖИДКОСТИ

ОБЪЁМНАЯ

- это объём жидкости, которые протекает через каждое сечение трубки за единицу времени.

$$Q = \frac{V}{t}, \left[\frac{M^3}{c} \right]$$



ЛИНЕЙНАЯ

- это расстояние, которое проходит каждая частица движущейся жидкости за единицу времени, м/с.

$$v = \frac{S}{t}, \left[\frac{M}{c} \right]$$

Рассмотрим течение идеальной жидкости через трубку переменного сечения, выделив в ней произвольно два разных сечения S_1 и S_2 .

При движении жидкости заданного объёма в **большем сечении** каждая частица проходит **меньший путь за единицу времени**, чем в меньшем сечении, т.е. скорость движения жидкости в большом сечении меньше, чем в маленьком.

Через каждое сечение трубки за единицу времени проходит одинаковый объём жидкости, то есть $Q_1 = Q_2 = \dots Q_n$

$$Q_1 = v_1 \cdot S_1 \quad Q_2 = v_2 \cdot S_2 \quad \rightarrow \quad v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = \dots = v_n \cdot S_n$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

Это выражение называется **уравнением неразрывности потока (струи)**.

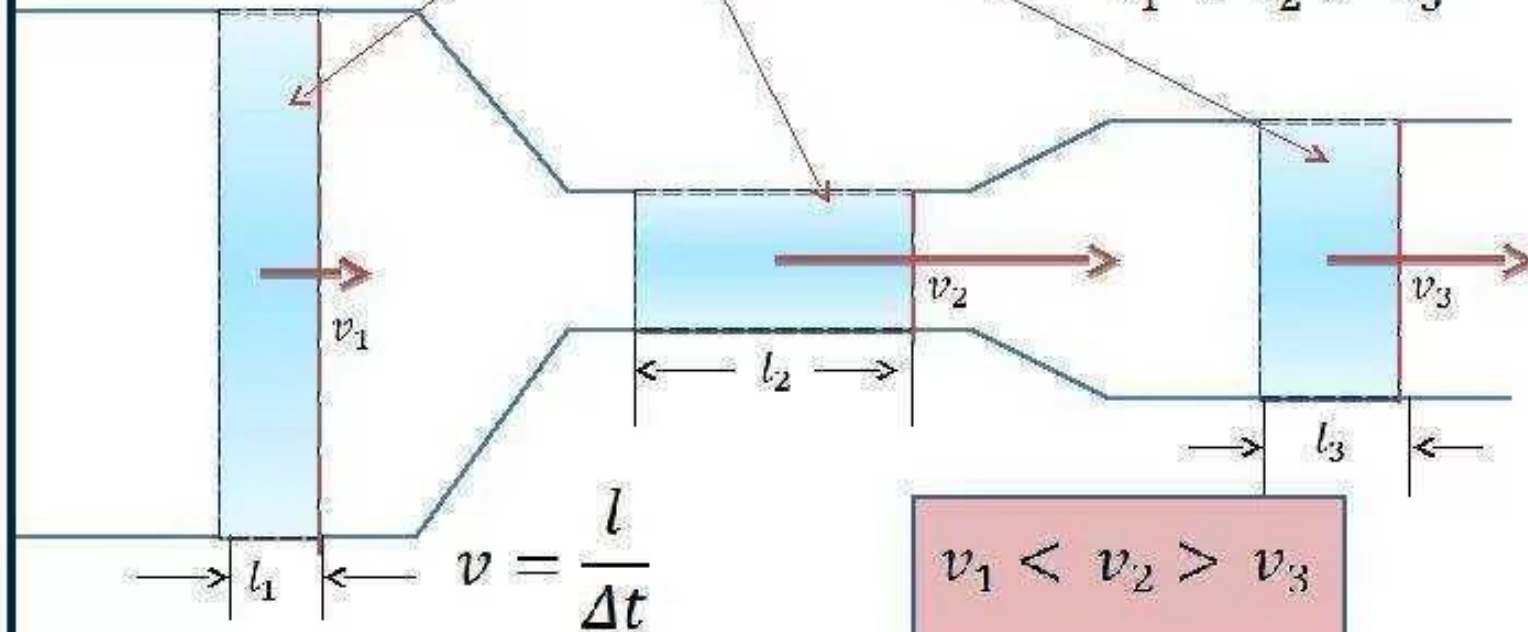
Течение жидкости по трубе переменного сечения

Через сечение труб за равное время проходит равный объем жидкости

$$V_1 = V_2 = V_3$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$$

$$l_1 < l_2 > l_3$$

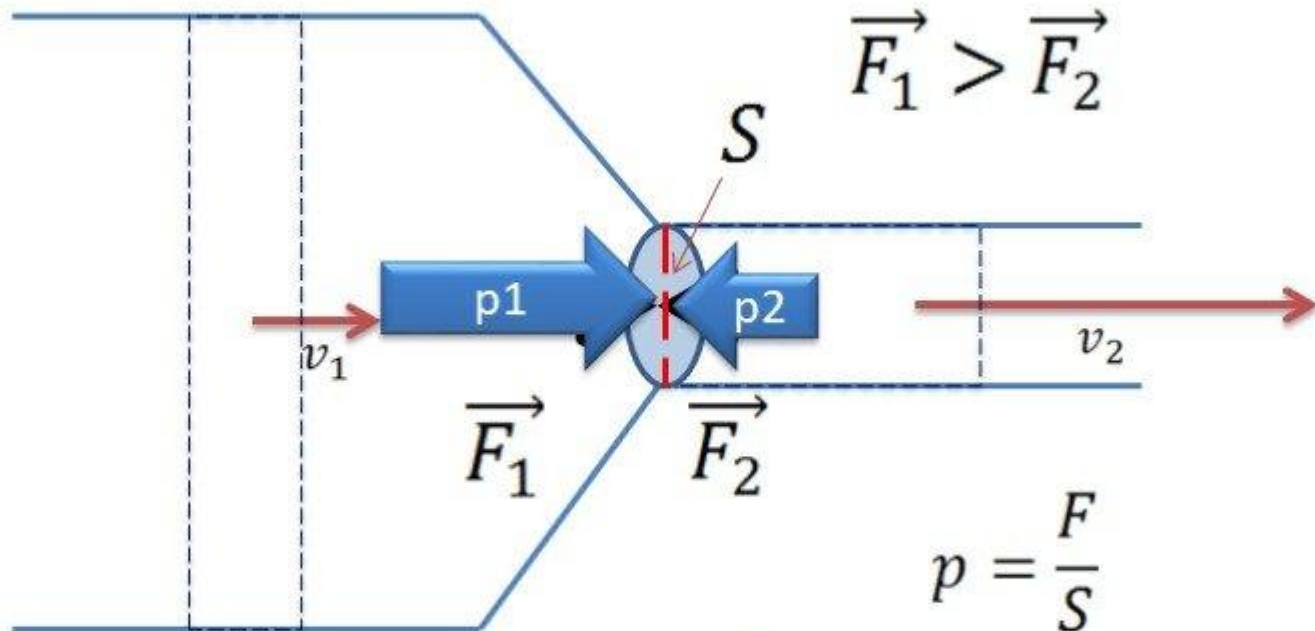


**Чем меньше сечение
трубы, тем**

больше скорость течения

Закон Бернулли

При переходе из одной трубы в другую, скорость жидкости увеличилась, значит силы действующие на жидкость с разных сторон в сечении S разные



Давление на поверхность

$$p_1 > p_2$$

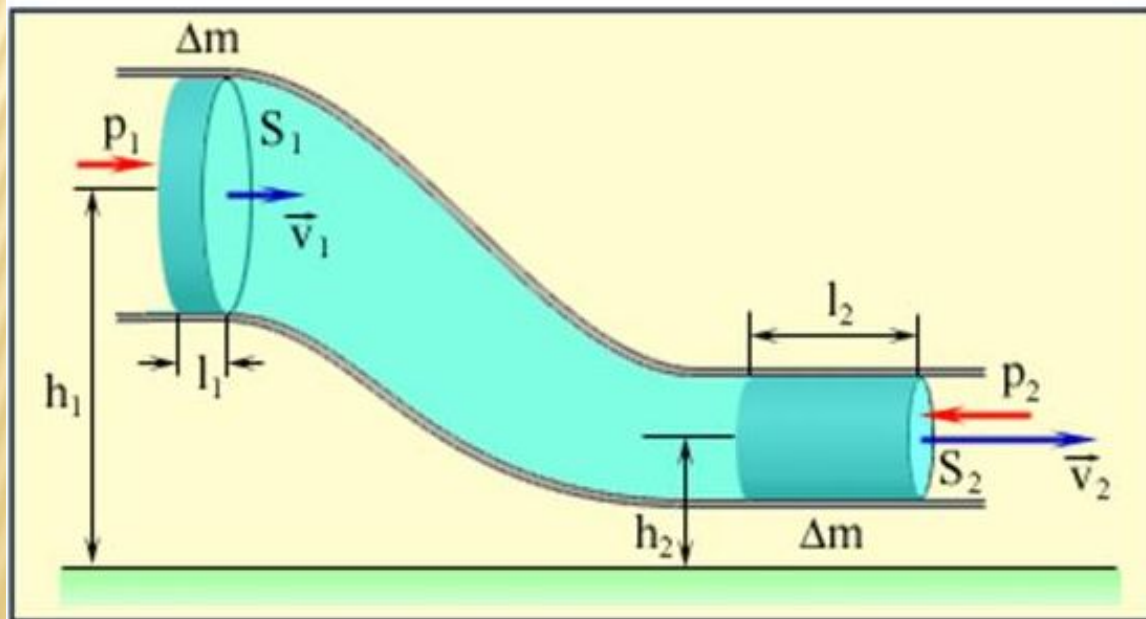
Давление текущей жидкости больше там, где ее скорость меньше, и наоборот.

Уравнение Бернулли

- Идеальной жидкостью* называется воображаемая жидкость, в которой отсутствуют силы внутреннего трения.

В стационарно текущей *идеальной жидкости* выбираем трубку тока, ограниченную сечениями S_1 и S_2 . По закону сохранения энергии изменение полной энергии жидкости массой m в местах сечений S_1 и S_2 равно работе внешних сил по перемещению этой массы жидкости

$$A = E_2 - E_1.$$



Уравнение Бернулли
— выражение закона сохранения энергии применительно к установившемуся течению идеальной жидкости.

Механика жидкости

$$E_1 = \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 \quad E_2 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2 \quad A = F_1 l_1 + F_2 l_2$$

$$l_1 = v_1 \Delta t \quad l_2 = v_2 \Delta t \quad F_1 = p_1 S_1 \quad F_2 = -p_2 S_2$$

$$\Delta V = S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t \quad m = \rho \Delta V$$

статическое давление

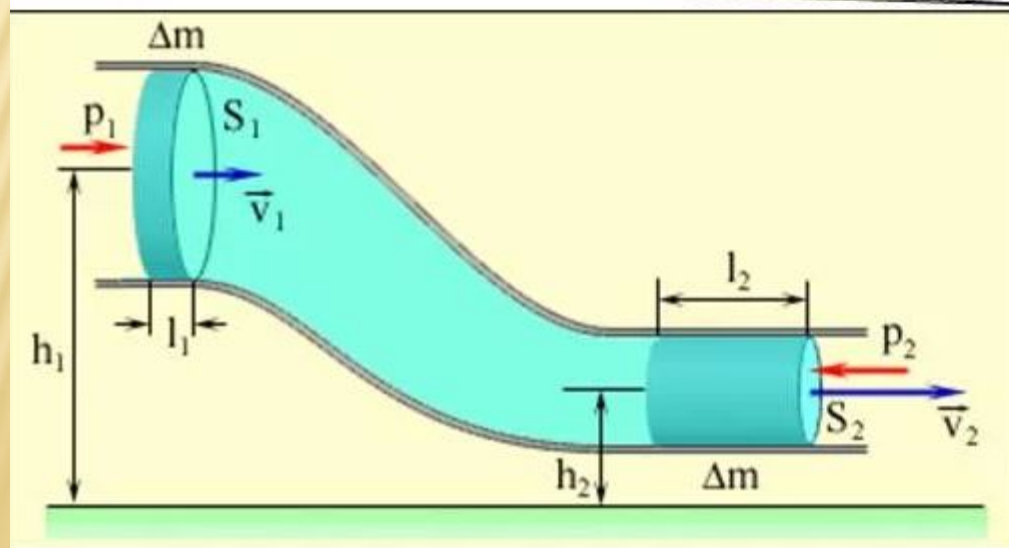
$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 + p_1 S_1 v_1 \Delta t = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2 + p_2 S_2 v_2 \Delta t$$

динамическое давление

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

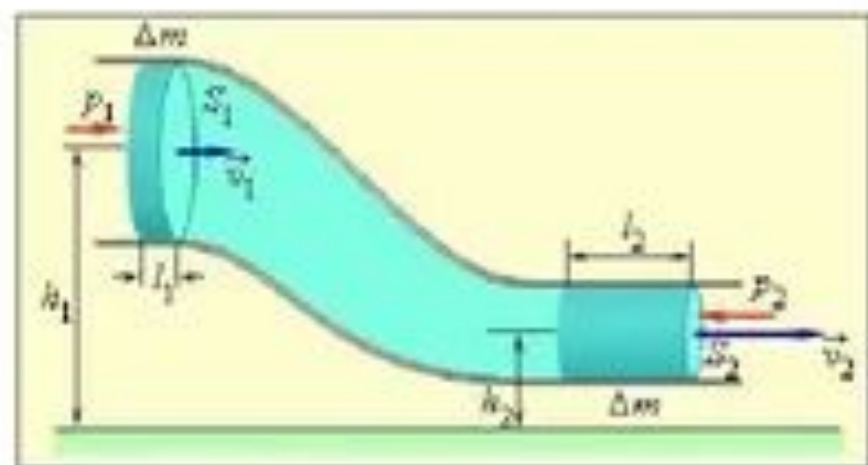
уравнение Бернулли

гидростатическое
давление



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:

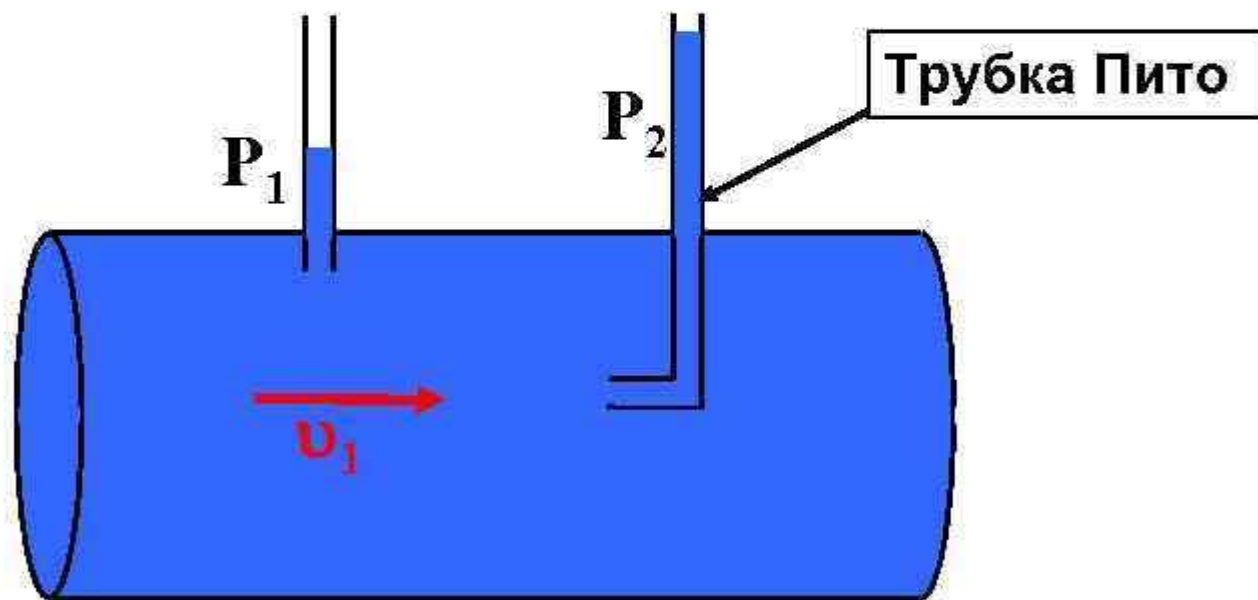
$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}$$



Даниил БЕРНУЛЛИ
(1700–1782)

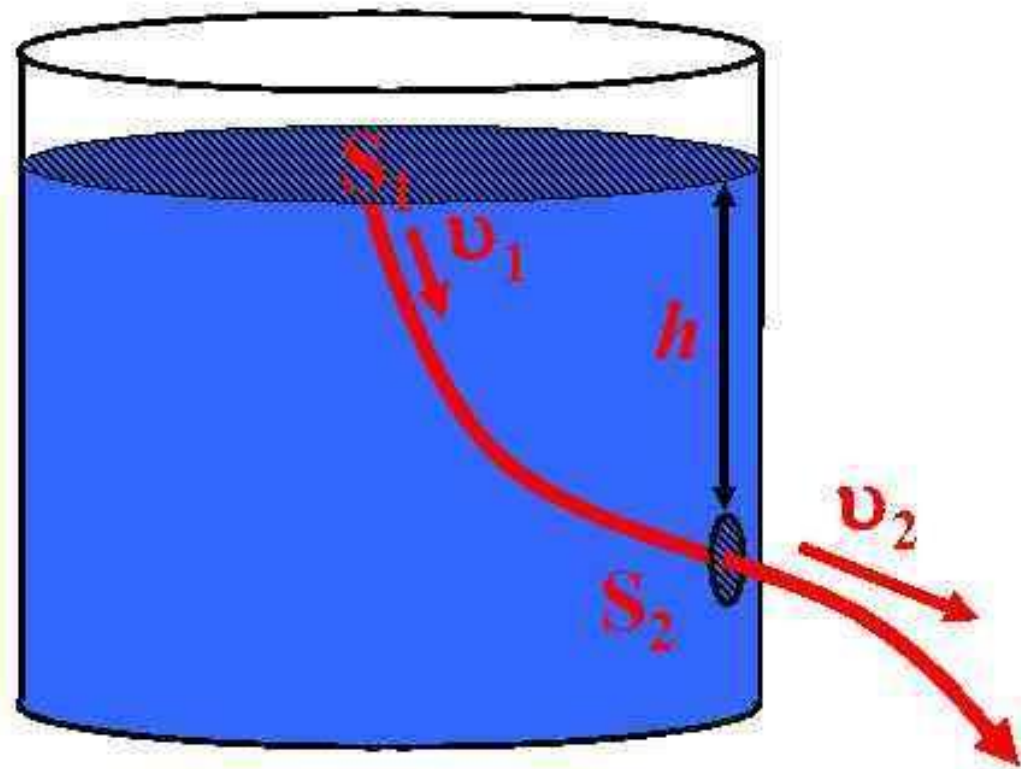
4) Измерение скорости жидкости

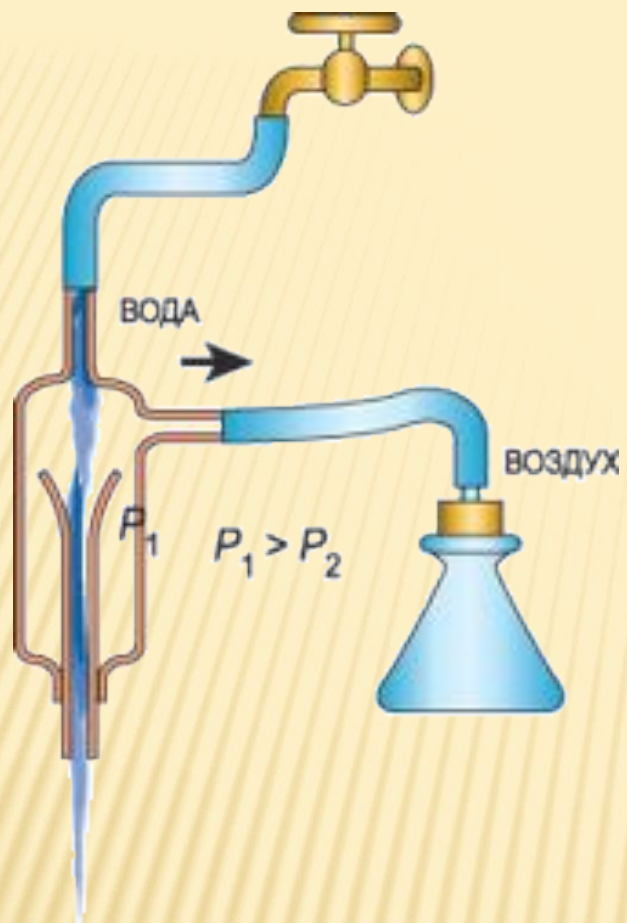
$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 \Rightarrow v_1 = \sqrt{2(P_2 - P_1) / \rho}$$



3) Истечение жидкости из отверстия

$$P_a + 0 + \rho gh_1 = P_a + \frac{\rho v_2^2}{2} + 0 \Rightarrow v_2 = \sqrt{2gh}$$

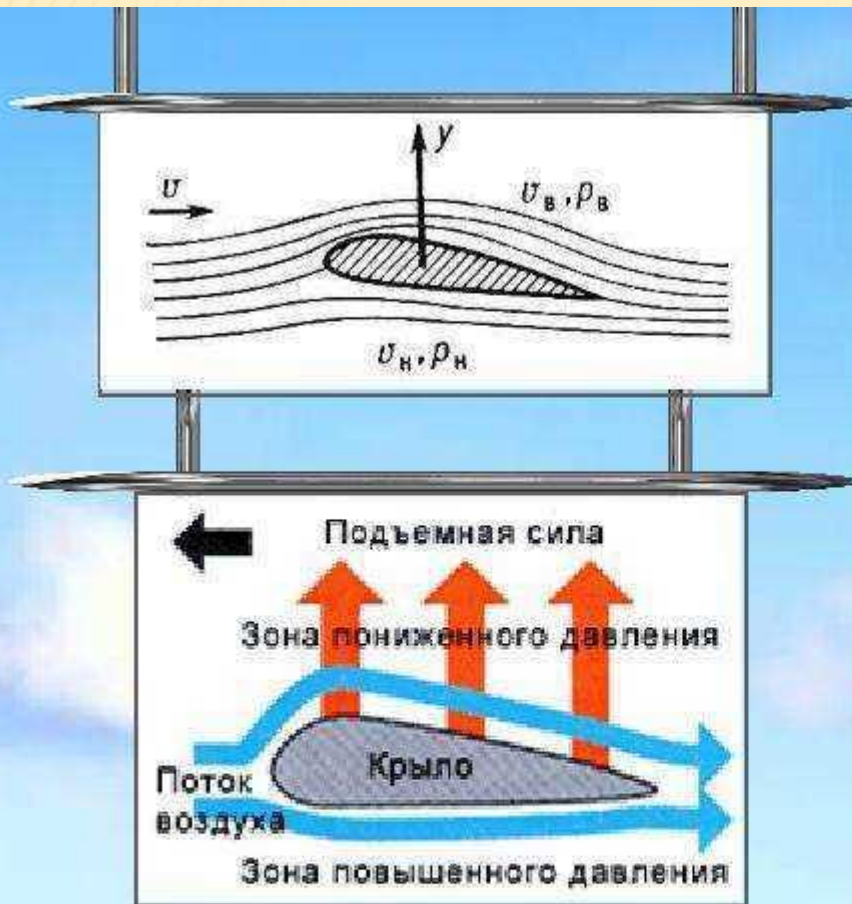




Как работает гидроэлектростанция?



Принцип работы ГЭС достаточно прост. На реке строится плотина, которая создает водохранилище. Вода по трубам подается сверху вниз с сильным напором. Внизу вода попадает на лопасти колеса турбины и вращает ее с большой скоростью. Турбина соединена валом (осью) с генератором, который вырабатывает электроэнергию. Электроэнергия идет по проводам и попадает в наши дома.



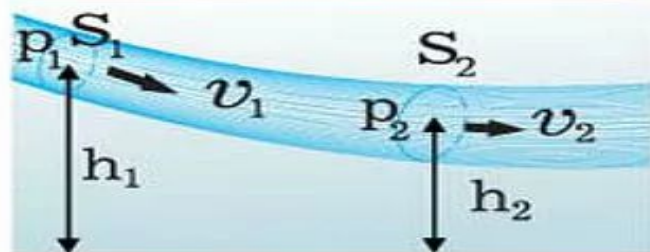
У крыла верхняя часть более выпуклая, чем нижняя, следовательно, верхним струйкам придётся пройти больший путь, чем нижним. Однако количество воздуха, набегающего на крыло и стекающего с него, одинаково. Значит, верхние струйки, чтобы не отставать от нижних, должны двигаться быстрее. Давление под крылом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

Подъёмная сила крыла



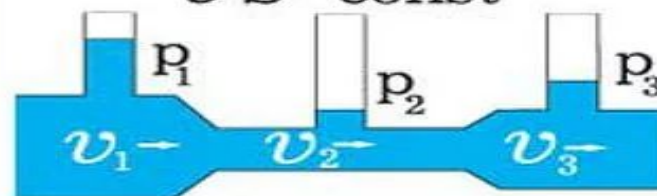


$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const}$$



УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ СТРУИ

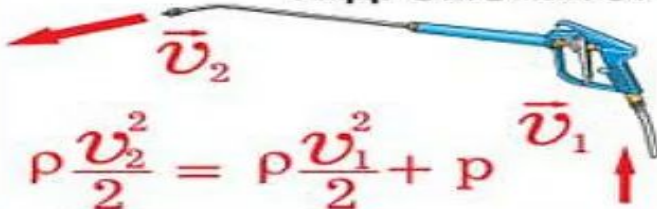
$$v S = \text{const}$$



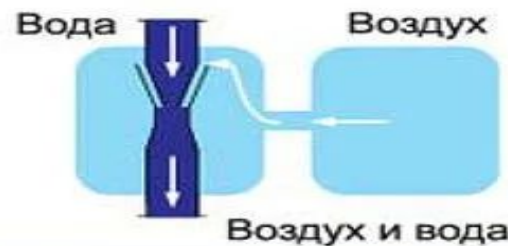
$$v_1 S_1 = v_2 S_2 = v_3 S_3$$

$$v_1 < v_3 < v_2 \quad p_1 > p_3 > p_2$$

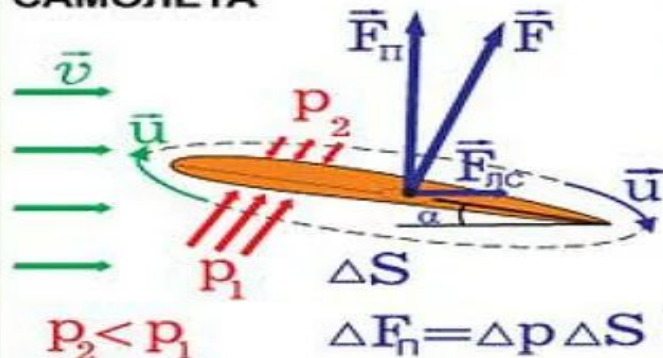
ГИДРОМОНИТОР



ВОДОСТРУЙНЫЙ НАСОС



ПОДЪЕМНАЯ СИЛА КРЫЛА САМОЛЕТА

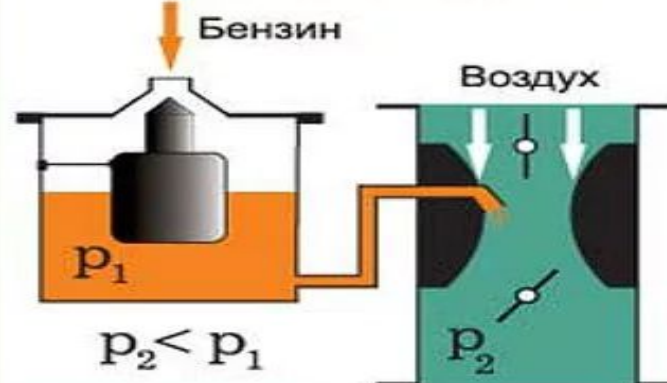


$$p_2 < p_1 \quad \Delta F_n = \Delta p \Delta S$$

Формула Н.Э. Жуковского

$$F_n = 2 \rho S v u$$

КАРБЮРАТОР



Вязкость.

Вязкостью или внутренним трением жидкости называется свойство, проявляющееся в сопротивлении, которое жидкость оказывает перемещению ее частиц под влиянием действующей на них силы. Внутреннее трение слоев данной жидкости – ее характерное физическое свойство, в котором проявляются силы межмолекулярного взаимодействия. Величина вязкости зависит от природы жидкости, т. е. от ее химического состава, химического строения и молекулярной массы.



Внутреннее трение (вязкость жидкости).

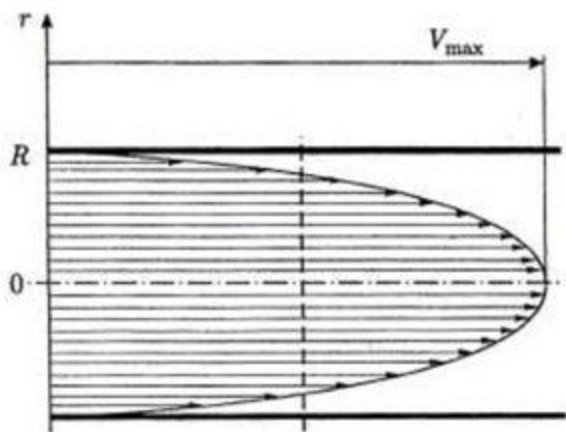
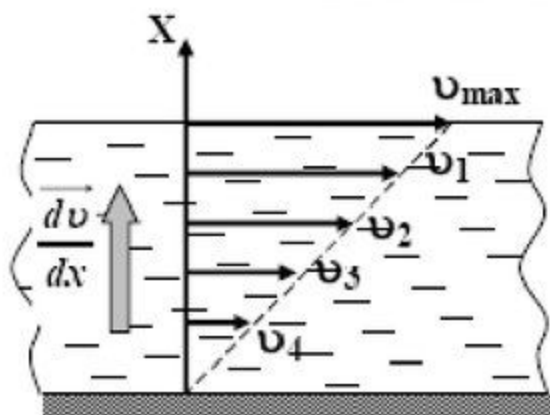
Уравнение Ньютона

Вязкость (внутреннее трение) – это свойство текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой

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

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

Формулировка: сила внутреннего трения F между слоями движущейся жидкости прямо пропорциональна скорости сдвига и площади поверхности соприкасающихся слоев S . Коэффициентом пропорциональности является коэффициент вязкости η .

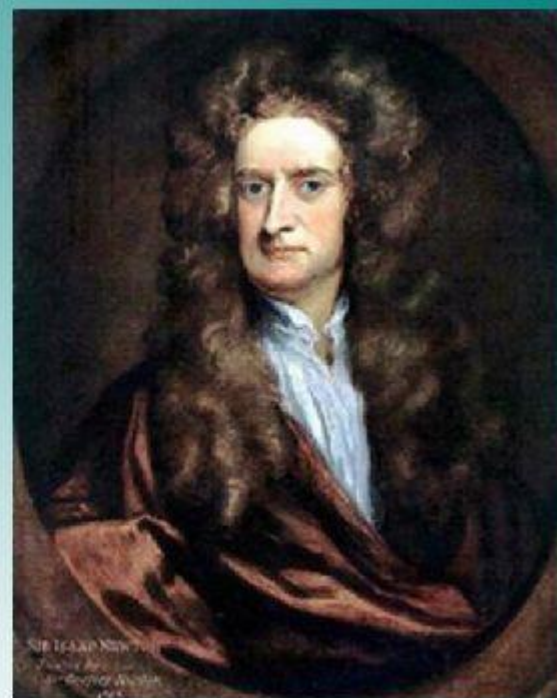


Уравнение Ньютона

определяет силу внутреннего трения $F_{тр}$

$$F_{тр} = \eta \frac{dV}{dx} S$$

S – площадь
соприкосновения
слоев



Исаак НЬЮТОН

η – вязкость (**динамическая вязкость**)

СИ: $[\eta] = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ (паскаль-секунда)

СГС $[\eta] = 1 \text{ П}$ (пуаз)

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ П}$$



$F_{тр}$ пропорциональна S



Чем больше η , тем больше $F_{тр}$

Вязкость некоторых веществ

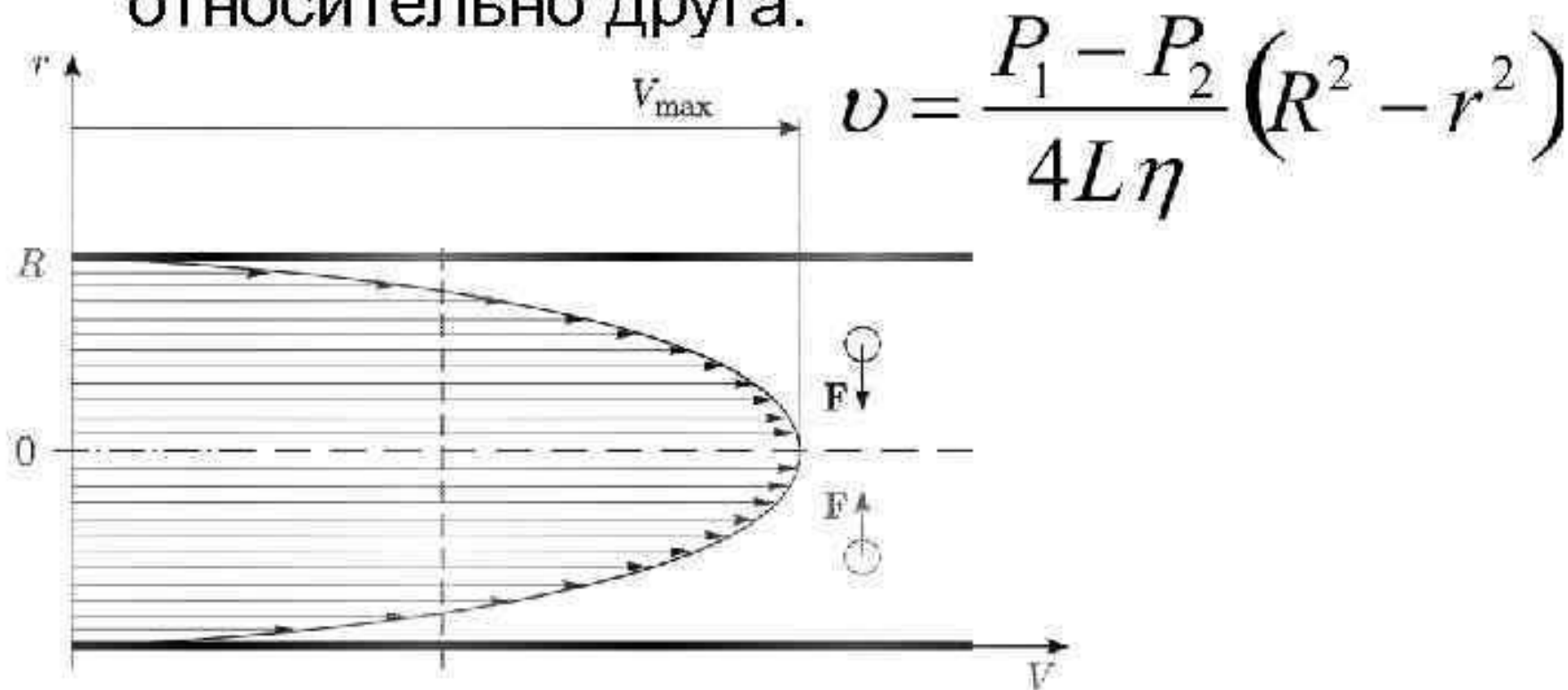
Вещество	Воздух	Вода	Глицерин	Кровь	Плазма крови
Температура [°C]	20	20	20	36	36
Вязкость [Па·с]	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$

Ньютоновские и неньютоновские жидкости

- **Ньютоновские жидкости** – такие, для которых вязкость не зависит от градиента скорости, они подчиняются уравнению Ньютона.
- **Неньютоновские жидкости** – такие, для которых вязкость зависит от режима течения и градиента скорости.

Ламинарное и турбулентное течение.

- Ламинарное (слоистое) течение – такое, при котором слои жидкости текут не перемешиваясь, скользя друг относительно друга.



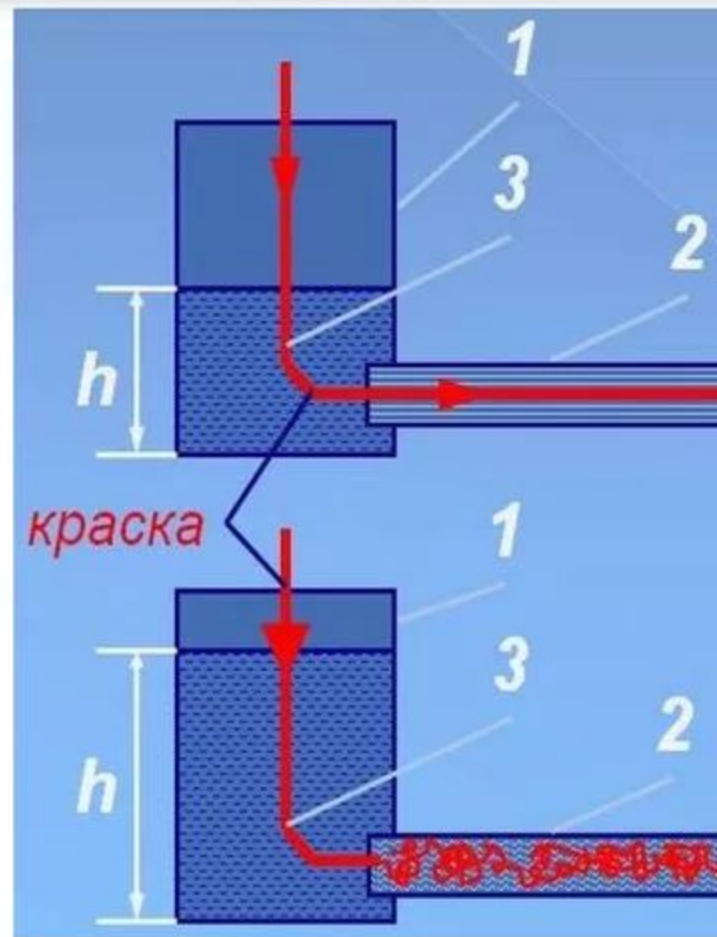
Режимы течения

В 1883 году английский физик О. Рейнольдс провел исследования, обнаружившие наличие двух разных режимов течения.

Наблюдаемые картины свидетельствовали о различном балансе взаимодействия сил инерции и сил вязкости.

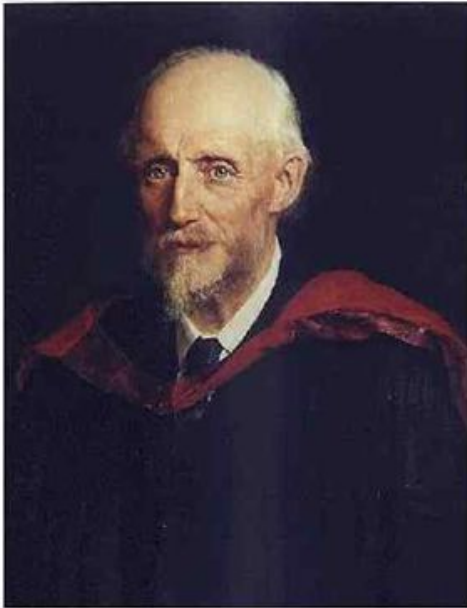
Если силы $F_{\text{вяз}} \gg F_{\text{ин}}$ - режим ламинарный

Если силы $F_{\text{вяз}} \ll F_{\text{ин}}$ - режим турбулентный



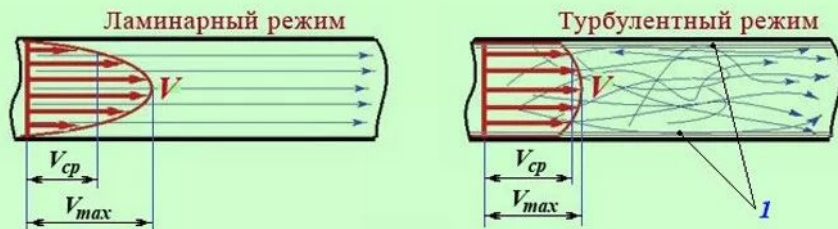
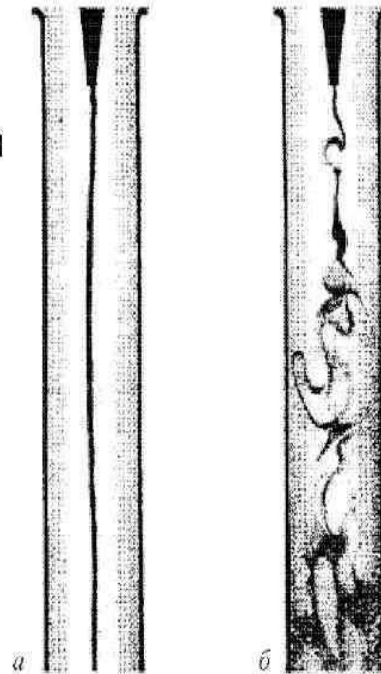
1 – напорный бак; 2 – тонкая трубка с краской; 3 – стеклянная трубка

Число Рейнольдса



Осборн Рейнольдс
(1842-1912)

- Турбулентное (вихревое) течение – такое течение, при котором скорости частиц жидкости в каждой точке непрерывно меняются.



Ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости:
1 - линии тока жидкости

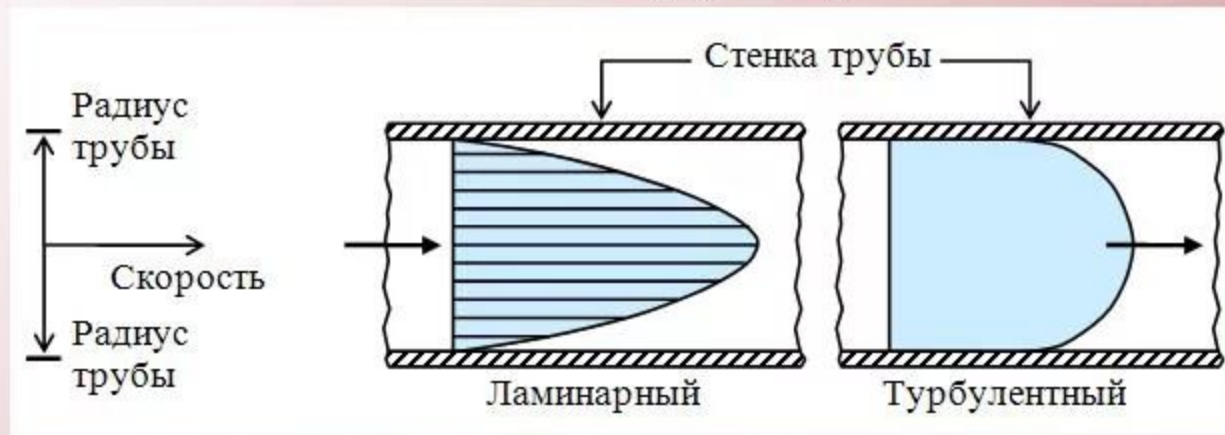
$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}$$

- ρ – плотность жидкости
- η – коэффициент вязкости
- v – скорость течения
- D – диаметр трубы

Задача:

почему профили скоростей ламинарного и

турбулентного потоков в трубе различны по форме?



- При малой скорости потока в гладкой трубе (число Рейнольдса $Re < 2300$) режим движения жидкости ламинарный и профиль скорости описывается параболой $u(z) = U \cdot z \cdot (h - z)$
- А при высокой скорости ($Re > 10000$) – турбулентный и профиль скорости гораздо более пологий и описывается логарифмической $u(z) = U \cdot \ln(z/z_0)$

Ламинарное и турбулентное течение

1. Ламинарное (слоистое)

течение – когда слои жидкости перемещаются не смешиваясь. Оно характерно для малых скоростей и небольшой вязкости η .

$$Re < 1000$$

2. Турбулентное (вихревое)

течение – происходит перемешивание слоев жидкости, вызванное появлением нормальной составляющей скорости частиц жидкости.

$$Re > 1000$$

ρ – плотность жидкости, v – средняя (по сечению трубы) скорость потока, η – коэффициент вязкости жидкости, r – радиус трубы

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot r}{\eta}$$

число Рейнольдса

η/ρ - кинематическая вязкость

Физический смысл числа Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

Число (критерий) Рейнольдса)
 Re - мера отношения силы инерции к силе трения

μ - динамический коэффициент вязкости

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

- кинематический коэффициент вязкости



При увеличении скорости растут силы инерции. Силы трения при этом больше сил инерции и до некоторых пор выпрямляют траектории струек

При некоторой скорости $v_{кр}$:

Сила инерции $F_{и} >$ силы трения $F_{тр}$, поток становится турбулентным

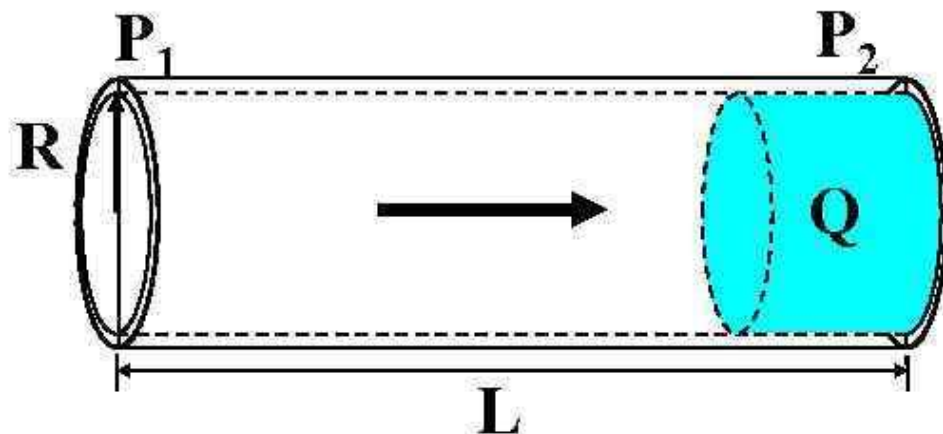
Формула Пуазейля



Пуазейль Жан Луи Мари
(1799-1869)

При ламинарном течении жидкости по трубе радиусом **R** и длиной **L** объем жидкости **Q**, протекающий через горизонтальную трубу за одну секунду, можно вычислить по формуле:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L} (P_1 - P_2)$$



Формула Пуазейля

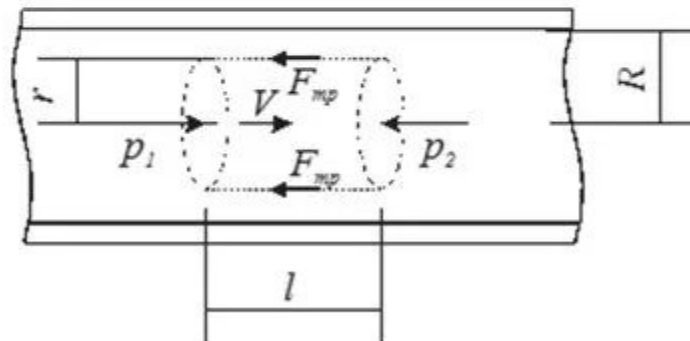
На боковую поверхность рассматриваемого цилиндра площадью $S = 2\pi r l$ действуют касательные усилия, равнодействующая которых, определяется по формуле Ньютона (2):

$F = \eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l$ и направление этой силы трения будет справа налево.

Так как течение жидкости установившееся, то должно иметь место равенство $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, (знак «-» означает что сила направлена противоположно движению).т. е.

$$\pi r^2 \Delta P = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l \quad (3)$$

Из этого равенства можно найти величину $\frac{dv}{dr}$, а затем получить закон распределения скоростей по сечению трубки.



УРАВНЕНИЕ ПУАЗЕЙЛЯ:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l}, \quad \text{где}$$

R – радиус трубы (сосуда)

η - вязкость жидкости (крови)

**($p_1 - p_2$) – перепад давлений на концах
трубы (сосуда)**

l - длина трубы (сосуда)

Гидродинамическое сопротивление

$$I = \frac{\Delta\varphi}{R} \qquad Q = \frac{\Delta P}{\left(8\eta L / \pi R^4\right)}$$

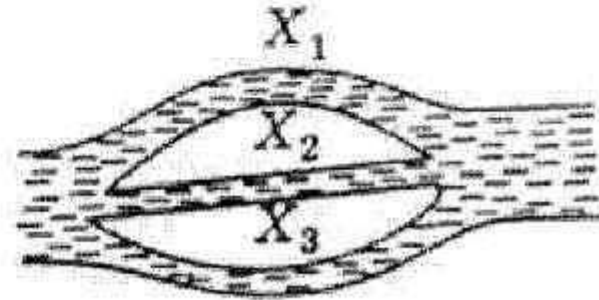
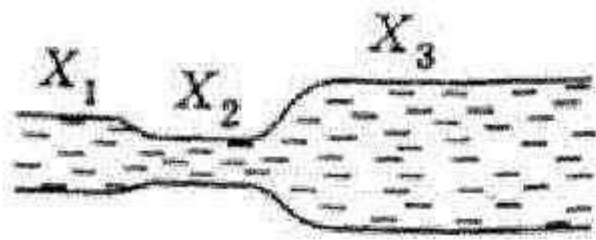
Закон Ома	Закон Пуазейля
I – количество заряда (сила тока)	Q – количество жидкости
Δφ – разность потенциалов (напряжение)	ΔP – разность давлений
R – сопротивление	$8\eta L / \pi R^4$ – гидродинамическое сопротивление

Гидродинамическое сопротивление

$$X = \frac{8\eta L}{\pi R^4}$$

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3}$$

$$X = X_1 + X_2 + X_3$$



Единицы измерения и Формула Пуазейля

Единицей **вязкости** в системе единиц СИ является **паскаль-секунда (Па с=Н с/м²)**. Как следует из формулы на 1 слайде, это такая вязкость, при которой градиент скорости с модулем, равным 1 м/с на высоте 1м, приводит к возникновению силы внутреннего трения в 1Н на 1м² поверхности касания слоев. Г.Хаген в 1839, повторно Пуазейль в 1840-41 рассчитали поток вязкой несжимаемой жидкости **ламинарно** протекающей через поперечное сечение тонкой цилиндрической трубки в единицу времени

$$Q = k \frac{(p_2 - p_1) d^4}{l} = \frac{\pi}{128\eta} \frac{(p_2 - p_1) d^4}{l} \quad \text{закон Пуазейля}$$

Основной вклад дает диаметр трубы d^4 (**вулканы**) а не разность давления p_1-p_2 и длина l . Связь k и η установлена Стоксом в 1845. Понятие вязкости относится и к **реальным газам!**

Что такое удельная, приведенная и характеристическая вязкость?

Как их определить экспериментально? Каковы единицы их измерения?

Зачем нужны эти понятия?

Допущение: для разбавленных растворов: $\rho \approx \rho_0$ (плотность раствора равна плотности растворителя)

УДЕЛЬНАЯ
ВЯЗКОСТЬ:

$$\eta_{\text{уд.}} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{K\rho t - K\rho_0 t_0}{K\rho_0 t_0} \approx \frac{t - t_0}{t_0}$$

t – время истечения раствора полимера, t_0 – время истечения чистого растворителя

Единицы измерения – безразмерная; Физический смысл – относительный прирост вязкости за счёт введения полимера (исключает влияние вязкости растворителя на прирост вязкости раствора)

ПРИВЕДЕННАЯ
ВЯЗКОСТЬ:

$$\eta_{\text{пр.}} = \frac{\eta - \eta_0}{C\eta_0} = \frac{\eta_{\text{уд.}}}{C} \approx \frac{t - t_0}{Ct_0}$$

C – весовая концентрация полимера в г/дл или г/см³

Единицы измерения – дл/г или см³/г; Физический смысл – исключает концентрационный вклад в прирост вязкости

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ
ВЯЗКОСТЬ $[\eta]$:

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \eta_{\text{пр.}} = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_0}{C\eta_0}$$

Единицы измерения – дл/г или см³/г; Характеристическая вязкость – это приведенная вязкость при бесконечном разбавлении. Физический смысл – характеризует молекулярные свойства отдельных клубков.

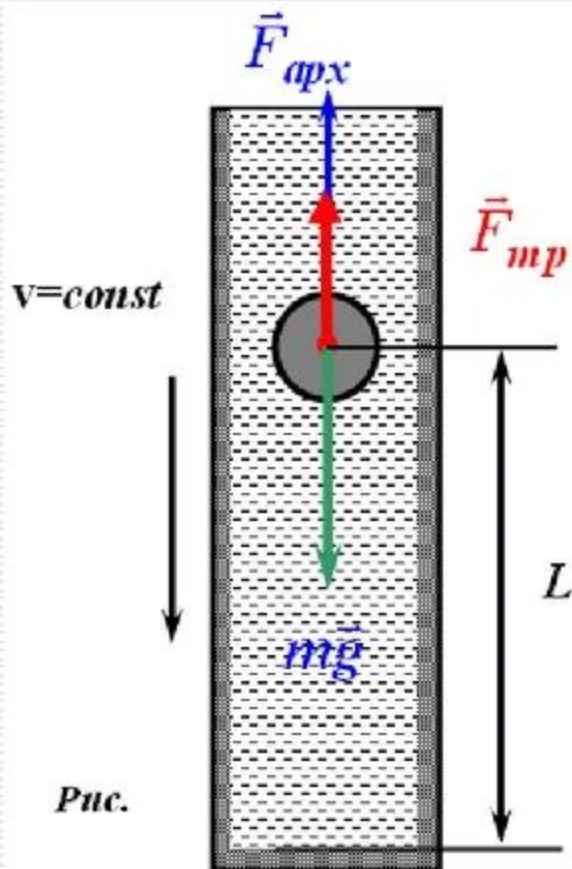
Методы определения вязкости

- Совокупность методов измерения вязкости называется **вискозиметрией**
- Прибор для измерения вязкости называется **вискозиметром**

Различают вискозиметры капиллярные, ротационные, основанные на методе Стокса

Методы определения вязкости

1. Метод Стокса (метод падающего шарика)



- Имеем длинный цилиндр, заполненный жидкостью плотностью $\rho_{ж}$, вязкость которой η надо определить.
- В этой жидкости падает шарик радиусом r , массой m и плотностью ρ ,
- Движение шарика определяется действующими на него тр силами:
 - силой тяжести $F_{\tau} = mg = \rho V_{шар} g = \rho (4\pi r^3/3) g$,
 - силой Архимеда $F_{арх} = \rho_{ж} V_{шар} g = \rho_{ж} (4\pi r^3/3) g$
($\rho_{ж}$ - плотность жидкости),
 - силой трения $F_{тр}$.

По закону Стокса сила сопротивления движению шарика (сила трения $F_{тр}$):

$$F_{тр} = 6\pi\eta r v$$

Сила трения $F_{тр}$ уменьшает скорость движения шарика v и через некоторое время после начала движения шарика в жидкости движение шарика становится равномерным ($v=const$).

Метод Стокса -2

При достижении *равномерного движения* сила тяжести становится равной сумме силы трения и силы Архимеда:

$$mg = F_{тр} + F_{арх} \quad \longrightarrow \quad \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = 6\pi\eta r v + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g$$

Выразим коэффициент вязкости *исследуемой жидкости* η :

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_{ж})r^2 g}{9v}$$

Вывод: для нахождения вязкости жидкости необходимо знать её плотность, а также радиус и плотность шарика.

Скорость движения шарика v определяется экспериментально: измеряется время t , за которое шарик равномерно проходит в жидкости расстояние L : $v = L/t$.

Ограничения метода Стокса

- требует большого количества исследуемой жидкости.
- требует равномерного движения шарика ($v = \text{const}$).
- исследуемая жидкость должна быть прозрачна.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

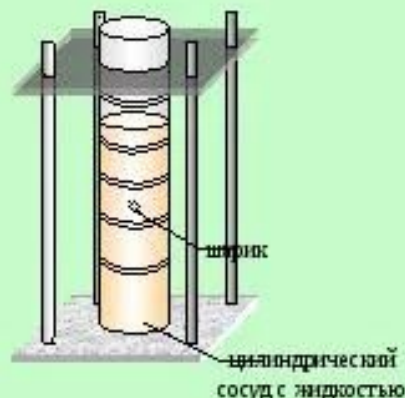


ЦЕЛЬ РАБОТЫ – определить коэффициент вязкости жидкости.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ – метод Стокса.

ФИЗИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ, лежащее в основе методики лабораторной работы – явление переноса импульса или свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одного слоя вещества относительно другого

ВИД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



ЗАКОНЫ И СООТНОШЕНИЯ

Закон Ньютона для силы вязкого трения:

$$F_{\text{втр}} = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S$$

На шарик действуют три силы: сила тяжести P , направленная вниз; сила сопротивления Стокса F_c и выталкивающая сила F_a , направленные вверх.

Величина выталкивающей силы Архимеда

$$F_a = \rho_{\text{ж}} g V = 4/3 \pi r^3 \rho_{\text{ж}} g$$

Величина силы сопротивления Стокса $F_c = 6 \pi \eta r v$

Величина силы тяжести $P = mg$ или $P = \rho g V = \rho g 4/3 \pi r^3$
В интервале времени $0 - t$: $v \neq \text{const}$.

В интервале времени $t > t_1$: движение шарика равномерное прямолинейное.

При равномерном движении $v = \text{const}$. Сила трения с увеличением скорости растет.

$$P + F_a + F_c = 0$$

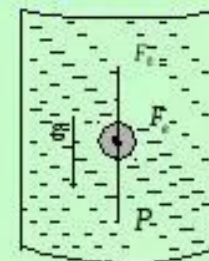
$$\text{или в проекциях на вертикальную ось } P - F_a - F_c = 0$$

РАСЧЕТНАЯ ФОРМУЛА

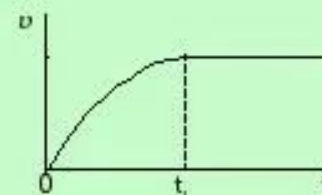
Коэффициент вязкости жидкости при $R \gg r$

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{v}$$

Схема приложения сил



Зависимость скорости движения шарика от времени



Здесь v – модуль скорости, $[v] = \text{м/с}$;
 g – ускорение свободного падения, $[g] = \text{м/сек}^2$; $\rho_{\text{ж}}$, ρ – плотность жидкости и шарика, $[\rho] = \text{кг/м}^3$; R – радиус сосуда, $[R] = \text{м}$; r , m , V – радиус, масса и объём шарика, $[r] = \text{м}$, $[m] = \text{кг}$, $[V] = \text{м}^3$

Максимальное значение скорости достигается в центре потока при $r = 0$ и составляет

$$v_{\max} = \frac{h_{\text{тр}} \rho g}{4\mu l} r_0^2$$

Средняя скорость в таком потоке будет

$$v = \frac{h_{\text{тр}} \rho g}{8\mu l} r_0^2$$

Зависимость потерь энергии от параметров движения жидкости называется **законом сопротивления** потоку или **законом Пуазейля**

$$h_{\text{тр}} = \frac{128\nu l Q}{\pi d^4 g}$$

Приравняем правые части формулы Дарси и закона Пуазейля

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \frac{128\nu l Q}{\pi d^4 g}$$

После преобразований получим

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

