

Гидростатика

Презентация подготовлена доцентом
кафедры физики и технических дисциплин,
к.т.н. Царевой Е.А.

План

1. Строение, характер теплового движения молекул жидкости.
2. Распределение давления внутри покоящейся жидкости. Закон Паскаля. Гидростатический закон. Измерение давления.
3. Следствия из гидростатического закона. Выталкивающая сила. Условие плавания тел.

Жидкое состояние

Кристаллы характеризуются наличием **дальнего порядка** – упорядоченное расположение частиц по отношению к любой частице наблюдается в пределах значительного объема.

Газы имеют полностью **разупорядоченное** (хаотическое) расположение частиц.

Жидкости обладают **ближним порядком**. По отношению к любой частице расположение ближайших к ней соседей является упорядоченным. Но по мере удаления от данной частицы, расположение по отношению к ней других частиц становится все менее упорядоченным.

Молекулы вещества в жидком состоянии расположены почти вплотную друг к другу.

В отличие от твердых кристаллических тел, в которых молекулы образуют упорядоченные структуры во всем объеме кристалла и могут совершать тепловые колебания около фиксированных центров, молекулы жидкости обладают большей свободой.

Каждая молекула жидкости, также как и в твердом теле, «зажата» со всех сторон соседними молекулами и совершает тепловые колебания около некоторого положения равновесия.

Однако, время от времени любая молекула может переместиться в соседнее вакантное место (кочующие молекулы). Такие перескоки в жидкостях происходят довольно часто; поэтому молекулы не привязаны к определенным центрам, как в кристаллах, и могут перемещаться по всему объему жидкости.

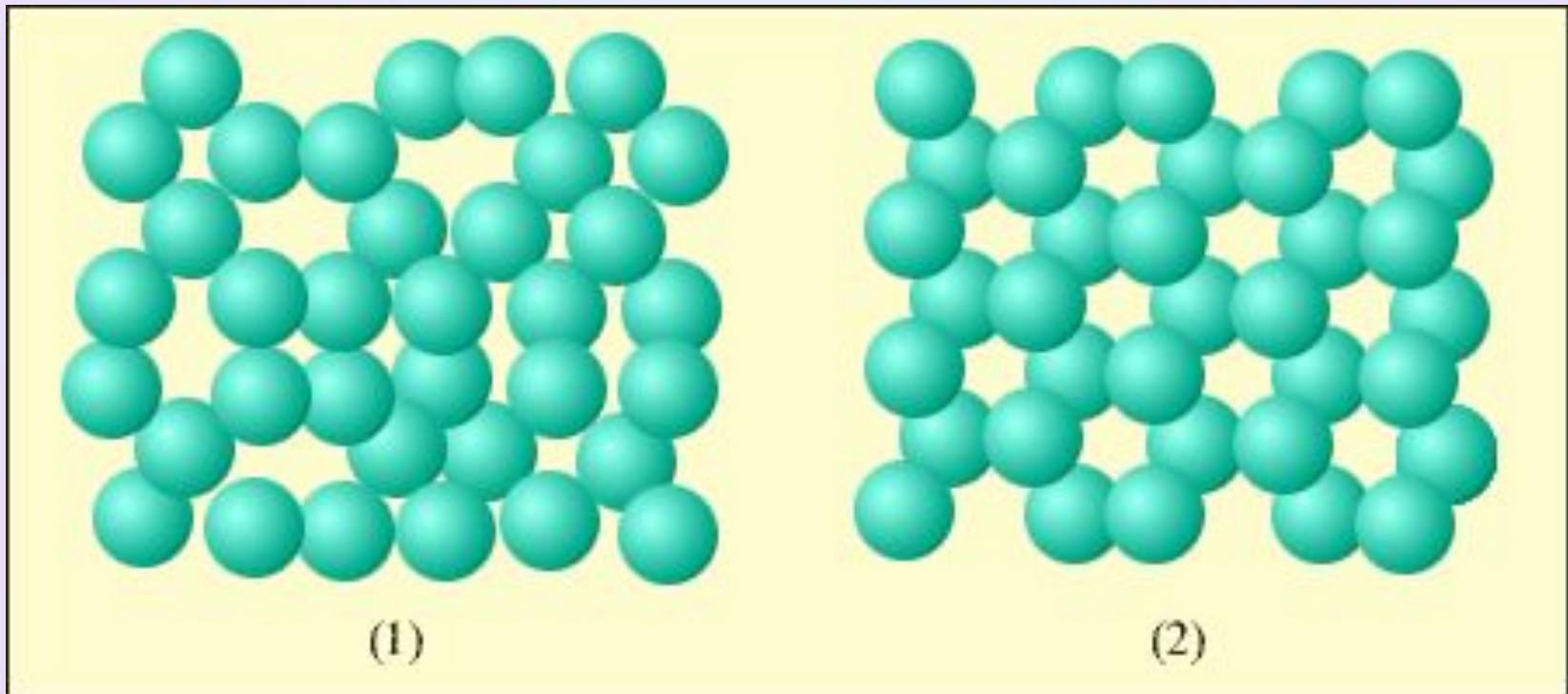
Время оседлой жизни молекул называется временем релаксации

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{W}{kT}}$$

Где τ_0 - средний период колебания молекулы около положения равновесия, W – минимальная энергия, которую нужно сообщить молекуле, для ее перескока через потенциальный барьер.

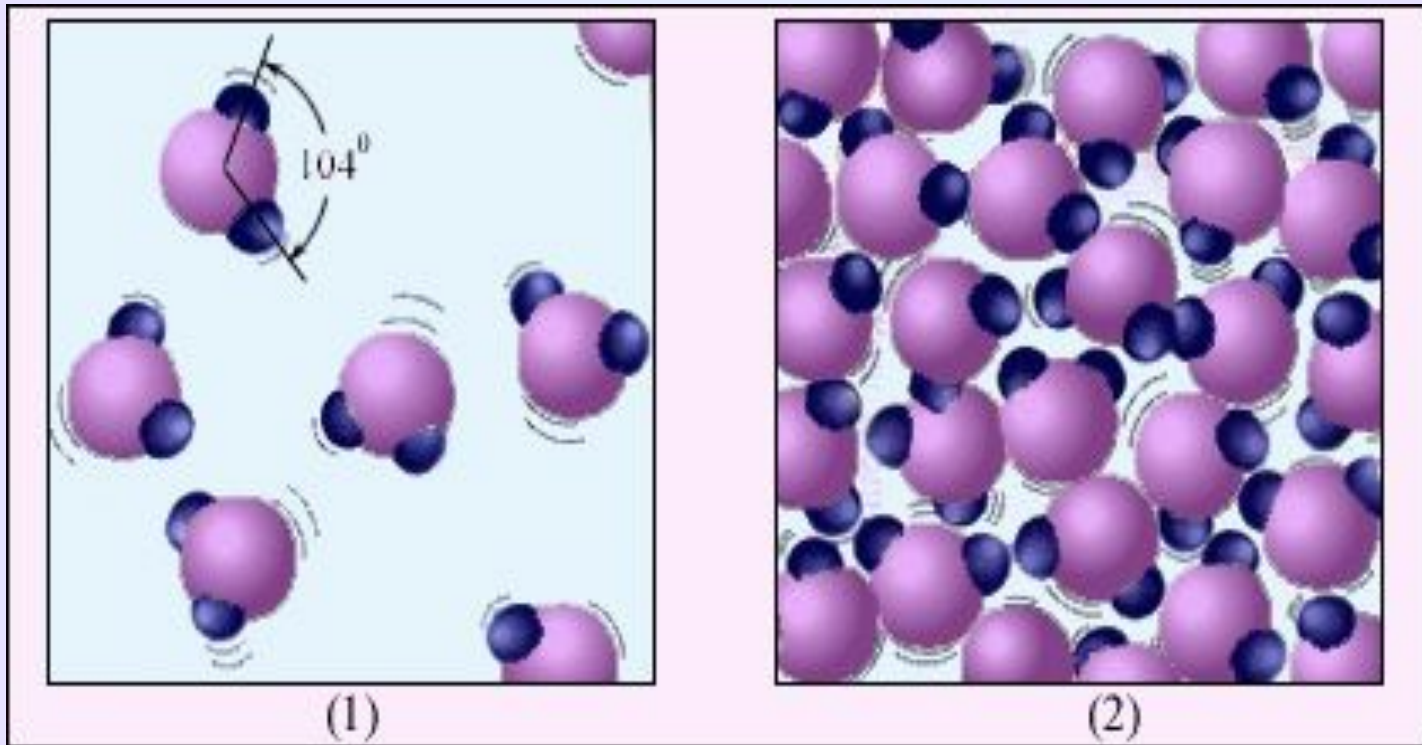
Из-за сильного взаимодействия между близко расположенными молекулами они могут образовывать локальные (неустойчивые) упорядоченные группы, содержащие несколько молекул. Это явление называется ближним порядком.

Чем отличаются твердые тела от жидких?



Пример ближнего порядка молекул жидкости и дальнего порядка молекул кристаллического вещества: 1 – вода; 2 – лед.

Чем отличаются газообразное состояние от жидкого?



1 - водяной пар

2 - вода

Молекулы газа, совершая беспорядочное, хаотическое движение, не связаны или весьма слабо связаны силами взаимодействия, поэтому они движутся свободно, и в результате соударений стремятся разлететься во все стороны, заполняя весь предоставленный им объем. Таким образом, **объем газа определяется объемом того сосуда, который газ занимает.**

Среднее расстояние между молекулами пара в десятки раз превышает среднее расстояние между молекулами воды.

Жидкость же, имея определенный объем, принимает форму того сосуда, в который она заключена. Но в жидкости в отличие от газов среднее расстояние между молекулами остается практически постоянным, поэтому жидкость обладает практически неизменным объемом.

Вследствие плотной упаковки молекул сжимаемость жидкостей, т. е. изменение объема при изменении давления, очень мала; она в десятки и сотни тысяч раз меньше, чем в газах.

Свойства жидкостей и газов во многом отличаются, однако в ряде механических явлений их поведение определяется одинаковыми параметрами и идентичными уравнениями.

Гидроаэромеханика - раздел механики, изучающий равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и обтекаемыми ими твердыми телами, - использует единый подход к изучению жидкостей и газов.

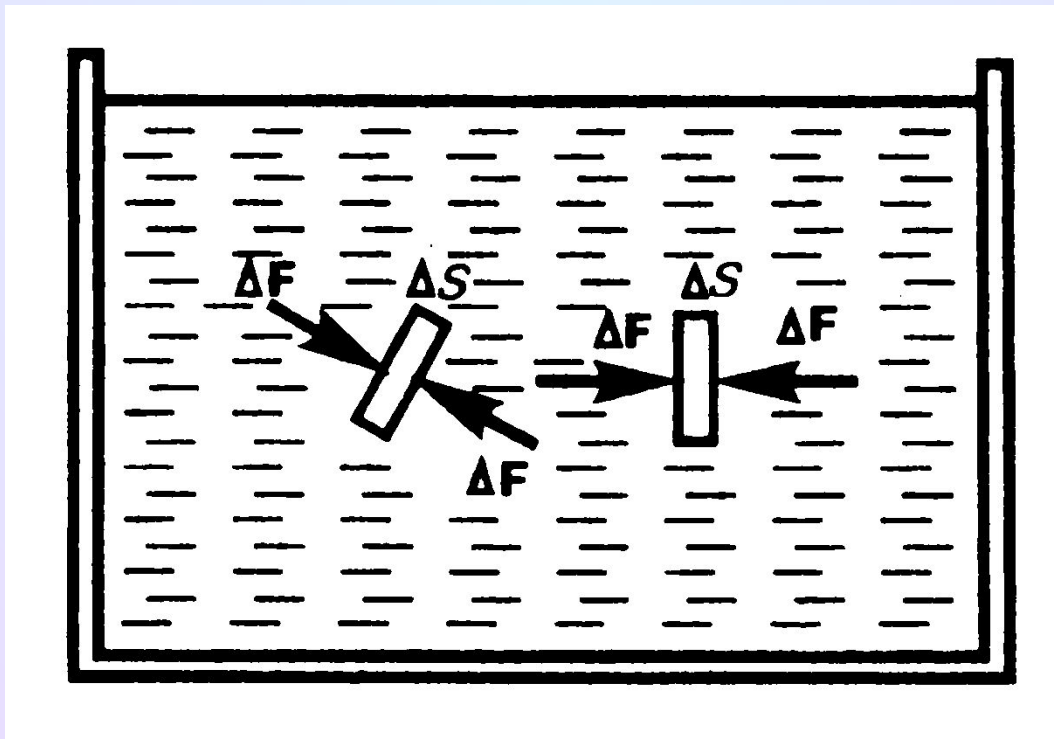
В механике с большой степенью точности жидкости и газы рассматриваются как сплошные, непрерывно распределенные.

Плотность же газов от давления зависит существенно.

Из опытов известно, что сжимаемостью жидкости можно пренебречь и пользоваться единым понятием

несжимаемой жидкости — жидкости, плотность которой всюду одинакова и не изменяется со временем.

Если в покоящуюся жидкость поместить тонкую пластинку, то части жидкости, находящиеся по разные стороны от нее, будут действовать на каждый ее $\Delta \vec{F}$ элемент с силами, которые независимо от того, как пластинка ориентирована, будут равны по модулю и направлены перпендикулярно площадке, ΔS так как наличие касательных сил привело бы частицы жидкости в движение.



Физическая величина, определяемая нормальной силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади называется **давлением** жидкости

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}$$

Единица давления – паскаль (Па).

Выясним свойства давления или газа, находящегося в состоянии равновесия.

Для этого рассмотрим находящуюся в сосуде под поршнем невесомую жидкость.

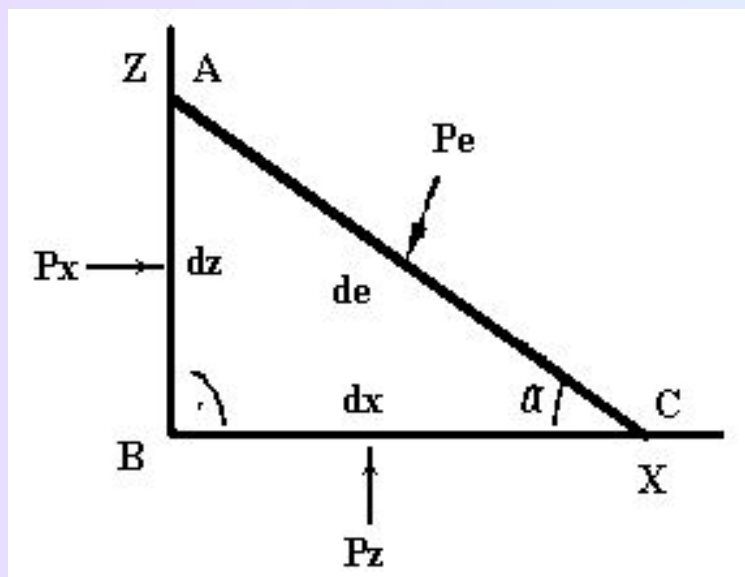
Рассмотрим роль веса жидкости на распределение давления внутри покоящейся несжимаемой жидкости. При равновесии жидкости давление по горизонтали всегда одинаково, иначе не было бы равновесия. Поэтому свободная поверхность покоящейся жидкости всегда горизонтальна вдали от стенок сосуда. Если жидкость несжимаема, то ее плотность не зависит от давления.

Тогда при поперечном сечении S столба жидкости, его высоте h и плотности ρ вес $P = \rho ghS$, а давление на нижнее основание

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\rho ghS}{S} = \rho gh$$

Давление ρgh называется гидростатическим давлением.

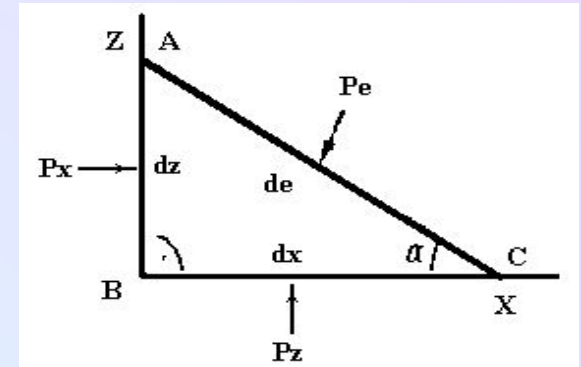
Выделим внутри жидкости элементарный объем в виде трехгранной призмы высотой h



- *Заменим действие жидкости вне призмы на ее боковые грани гидростатическим давлением соответственно P_x , P_z , P_e , кроме этих сил на призму действует сила тяжести dG , равная mg (с целью упрощения грань dy не рассматриваем).*

Так как частица жидкости находится в равновесии, в покое, то сумма проекций всех сил, приложенных к ней, на любое направление равна нулю

$$\begin{aligned} \Sigma x=0; & \quad p_x dz - p_e de \sin \alpha = 0, \\ \Sigma z=0; & \quad p_z dx - p_e de \cos \alpha = 0. \end{aligned}$$



Подставляя $dz = de \sin \alpha$ и $dx = de \cos \alpha$, получим

$$\begin{aligned} p_x &= p_e & p_z &= p_e \\ p_x &= p_z & &= p_e \end{aligned}$$

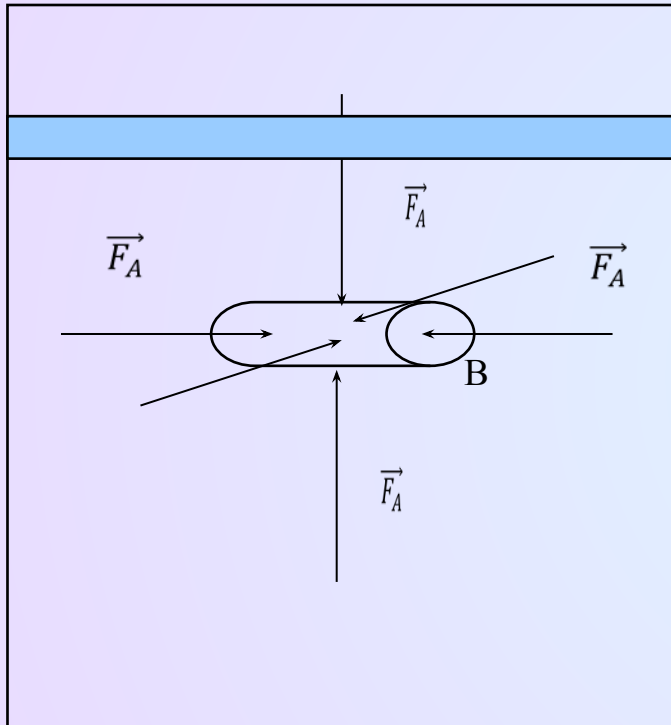
Следовательно, гидростатическое давление на наклонную грань p_e **одинаково** по величине с гидростатическим давлением на вертикальную и горизонтальную грани. Так как угол наклона грани (α) взят произвольно, то можно утверждать, что **гидростатическое давление в любой точке жидкости действует одинаково по всем направлениям.**

Внутри покоящейся невесомой жидкости (газа) давление со всех сторон на любой малый элемент одинаково. Полученный вывод справедлив и для весоных жидкостей. Это связано с тем, что сила тяжести пропорциональна объему элемента, а сила давления его площади поверхности. С уменьшением размеров элемента сила тяжести убывает пропорционально кубу, а сила давления пропорционально квадрату линейных размеров элемента. Поэтому начиная с какого-то малого размера силой тяжести по сравнению с силой давления можно пренебречь.

Давление при равновесии жидкостей (газов) подчиняется **закону Паскаля**: давление в любом месте **покоящейся** жидкости одинаково по всем направлениям, причем давление одинаково передается по всему объему, занятому **покоящейся** жидкостью.

Распределение давления в покоящейся жидкости

Рассмотрим распределение давления в покоящейся жидкости. Рассмотрим сосуд с жидкостью. Сравним давление в двух произвольно выбранных точках, находящихся в одной горизонтальной плоскости.



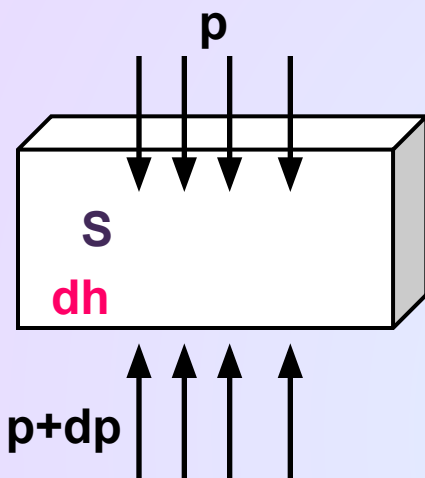
Выделим элемент жидкости в виде тонкого прямого цилиндра так, чтобы точки A и B оказались в центрах его оснований. Выберем цилиндр настолько тонким, чтобы можно было считать, что давление во всех точках оснований одинаково.

Жидкость находится в равновесии А значит сумма всех сил, действующих на элемент равна нулю.



$$\vec{F}_A$$

Гидростатическое давление



При $h=0$ $\text{Const} = p_0$

Сила давления снизу должна уравнивать вес элемента и силу давления сверху. Пусть ρ - плотность жидкости, тогда

$$(p+dp) S = mg + pS = \rho dh S g + pS$$

$$dp = \rho g dh$$

Если от поверхности до глубины h величины ρ и g не меняются, то, интегрируя, получим

$$p = \rho g h + \text{Const}$$

$$p = p_0 + \rho g h$$

$\rho g h$ – гидростатическое давление.

Давление в покоящейся жидкости увеличивается с глубиной погружения – гидростатический закон

Измерение давления

- Самостоятельно

Следствия из гидростатического закона. Архимедова сила.
Условие плавания тел

Самостоятельно

ГИДРОДИНАМИКА

План

1. Некоторые основные понятия гидродинамики. Стационарное слоистое движение жидкости. Уравнение неразрывности.
2. Уравнение Бернулли для идеальной жидкости и его следствия. Формула Торричелли.
3. Реакция вытекающей струи.
4. Движение вязкой жидкости. Формулы Ньютона и Пуазейля.
5. Ламинарное и турбулентное течение. Число Рейнольдса.
6. Движение тела в вязкой среде. Формула Стокса.
7. Подъемная сила.

- **Гидродинамика** (от гидро- и динамика), раздел гидравлики, в котором изучаются движение несжимаемых жидкостей и взаимодействие их с твёрдыми телами.
- *Кинематика* жидкости обычно в гидравлике рассматривается совместно с динамикой и отличается от нее изучением видов и кинематических характеристик движения жидкости без учета сил, под действием которых происходит движение, тогда как динамика жидкости изучает законы движения жидкости в зависимости от приложенных к ней сил.

- **Гидродинамическое давление (p)** – это внутреннее давление развивающееся при движении жидкости.
- **Скорость движения жидкости в данной точке (u)** – это скорость перемещения находящейся в данной точке частицы жидкости, определяемая длиной пути l , пройденного этой частицей за единицу времени t .

- Существует два способа изучения движения жидкости - Лагранжа и Л. Эйлера.
- **Способ Лагранжа** заключается в рассмотрении движения каждой частицы жидкости, т. е. *траектории их движения*. В начальный момент времени положение частицы определено начальными координатами ее полюса x_0, y_0, z_0 . При движении частица перемещается и ее координаты изменяются, Движение жидкости определено, если для каждой частицы можно указать координаты x, y и z как функции начального положения (x_0, y_0, z_0) и времени t :
 - $x = x(x_0, y_0, z_0, t)$;
 - $y = y(x_0, y_0, z_0, t)$;
 - $z = z(x_0, y_0, z_0, t)$.
- Переменные x_0, y_0, z_0 и t называют **переменными Лагранжа**.

- **Способ Эйлера** заключается в рассмотрении движения жидкости в различных точках пространства в данный момент времени.
- Метод позволяет определить скорость движения жидкости в любой точке пространства в любой момент времени, т. е. характеризуется построением *поля скоростей* и поэтому широко применяется при изучении движения жидкости.
- В данный момент времени в каждой точке этой области, определяемой координатами x, y, z находится частица жидкости, имеющая некоторую скорость u , которая называется ***мгновенной местной скоростью***.
- Совокупность *мгновенных местных скоростей* представляет векторное поле, называемое ***полем скоростей***.
- *Поле скоростей* может изменяться во времени и по координатам:
- $u_x = u_x(x, y, z, t);$
- $u_y = u_y(x, y, z, t);$
- $u_z = u_z(x, y, z, t).$
- Переменные x, y, z и t называют ***переменными Эйлера***.
- Векторными линиями поля скоростей являются линии тока.

- По характеру изменения поля скоростей во времени движения жидкости делятся на *установившиеся, неустановившиеся и квазистационарное*.
- ***Установившееся движение*** – движение, при котором, в любой точке потока жидкости скорость (и давление) с течением времени не изменяется, т. е. зависят только от координат точки
- $u_x = u_x(x, y, z)$.
- ***Неустановившееся движение*** – движение, при котором в любой точке потока жидкости скорость с течением времени изменяется, т. е.
- $u_x = u_x(x, y, z, t)$.
- ***Квазистационарное движение*** – движение, при котором изменчивость характеристик движения жидкости в течение выбранного промежутка времени не является существенной, т.е. ее влияние лежит в пределах допустимой точности решения, и его можно рассматривать как установившееся.

- Установившееся движение жидкости подразделяется на *равномерное и неравномерное*.
- *Равномерным* называется установившееся движение, при котором живые сечения вдоль потока не изменяются: в этом случае $v = const$; средние скорости по длине потока также не изменяются, т.е.

$$v = const$$

- Установившееся движение называется *неравномерным*, когда распределение скоростей в различных поперечных сечениях неодинаково; при этом средняя скорость и площадь поперечного сечения потока могут быть и постоянными вдоль потока.

- Потоки жидкости по своему характеру подразделяются **на напорные, безнапорные и гидравлические струи.**
- При **напорном** движении поток не имеет свободной поверхности, т. е. соприкасается с твердыми стенками со всех сторон.
- При **безнапорном** движении поток имеет свободную поверхность, т. е. он соприкасается с твердыми стенками лишь по части периметра.
- В **гидравлических струях** поток окружен со всех сторон свободной поверхностью.

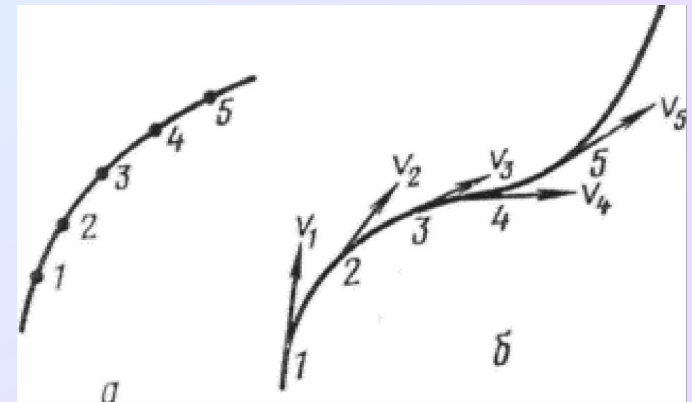
Гидравлические характеристики движения жидкости

Траектория движения частицы жидкости – это путь движения отдельной частицы жидкости в пространстве.

При *установившемся* движении траектория движения частиц жидкости неизменна по времени.

При *неустановившемся* движении траектория движения частиц непрерывно меняется по времени, т. к. происходит изменение скорости течения по величине и по направлению.

Траектория движения изображает путь, который проходит частица жидкости за некоторый промежуток времени.



а – траектория движения частиц,
б – линии тока

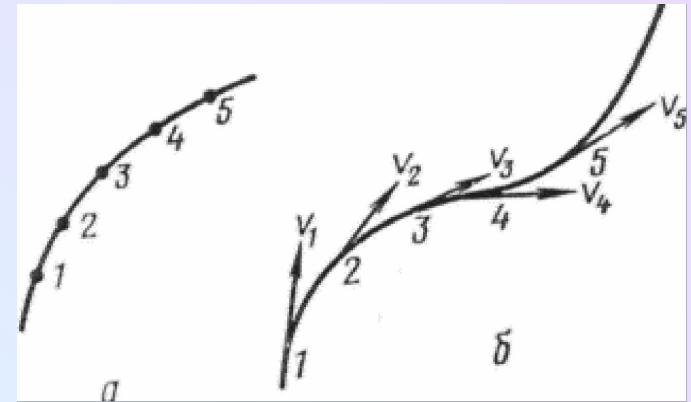
Гидравлические характеристики движения жидкости

Линия тока – это линия, проведенная через ряд точек в движущейся жидкости таким образом, что в каждой из этих точек векторы скорости в данный момент времени касательны к ней.

Густота линий тока пропорциональна модулю скорости в данном месте.

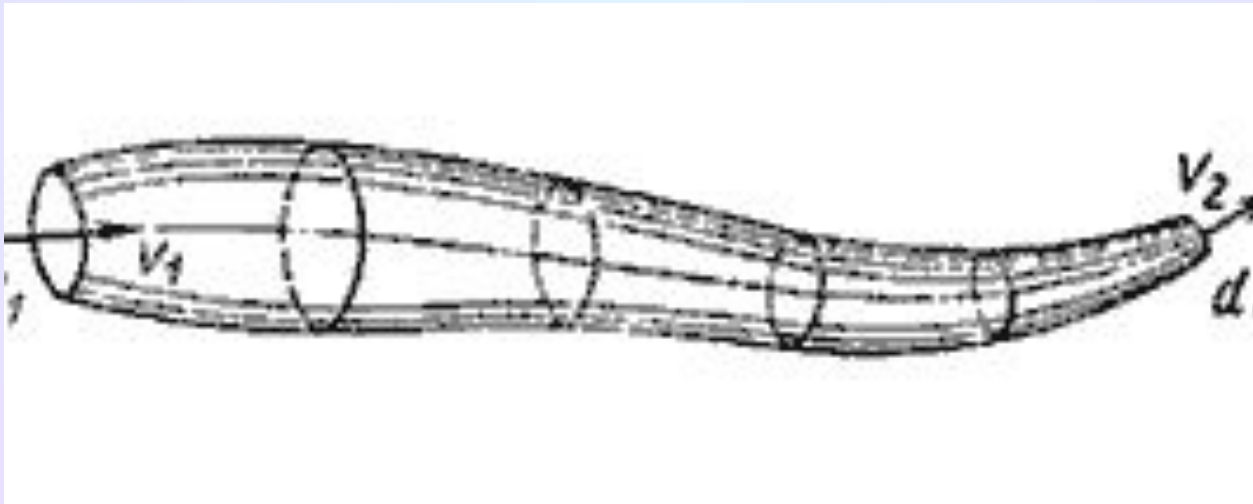
Линия тока дает некоторую мгновенную характеристику потока, связывает различные частицы жидкости, лежащие на линии тока в данный момент, и показывает направление вектора скорости частиц в этот момент.

При установившемся движении жидкости траектория движения частиц жидкости совпадает с линией тока.



а – траектория движения частиц,
б – линии тока

Трубка тока – трубчатая непроницаемая поверхность, которая образуется если в движущейся жидкости взять бесконечно малый замкнутый контур и через все его точки провести линии тока.

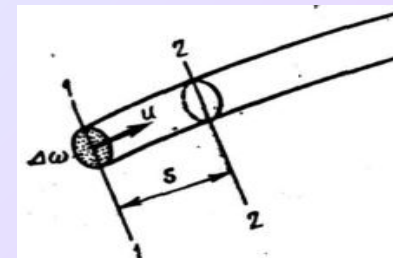


- **Элементарной струйкой** называется часть жидкости, заключенная внутри трубки тока. Элементарная струйка характеризует состояние движения жидкости в данный момент времени t .

- При установившемся движении элементарная струйка имеет следующие свойства:

- 1. форма и положение элементарной струйки с течением времени остаются неизменными, так как не изменяются линии тока;
- 2. приток жидкости в элементарную струйку и отток из нее через боковую поверхность невозможен, так как по контуру элементарной струйки скорости направлены по касательной;
- 3. скорость и гидродинамическое давление во всех точках поперечного сечения элементарной струйки можно считать одинаковым ввиду малости площади.

- **Потоком жидкости** называется совокупность движущихся с разными скоростями элементарных струек.



- К гидравлическим характеристикам движения жидкости относятся понятия *живого сечения, смоченного периметра, гидравлического радиуса, расхода жидкости и средней скорости.*
- *Живое сечение* (w) – это поперечное сечение потока, перпендикулярное ко всем линиям тока.
- *Например,* в круглой трубке диаметром d , в которой все поперечное сечение занято жидкостью, живое сечение – это площадь круга

$$w = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ м}^2.$$

- **Расход жидкости** (Q) – это ее объем, протекающий в единицу времени через живое сечение потока. Расход для элементарной струйки

- $dQ = vdw,$

- где v – истинная скорость движения частиц жидкости, dw
□ □ площадь сечения элементарной струйки.

- **Средняя скорость** – отношение расхода к площади живого сечения

- $v = Q/w,$

- откуда

- $Q = wv, \text{ м}^3/\text{с}.$

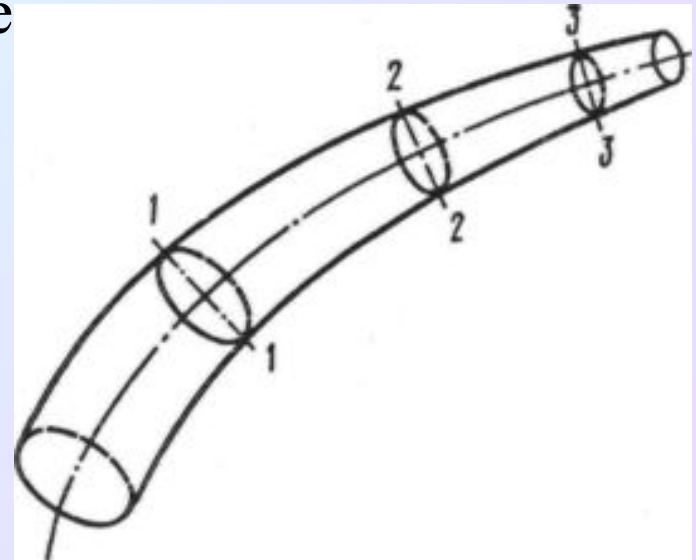
Уравнение неразрывности движения жидкости

- Возьмем сечение $1-1$ с площадью Δw_1 и скоростью движения частиц жидкости v_1 . Элементарный расход через сечение $1-1$ равен

$$\Delta Q_1 = v_1 \Delta w_1$$

- Затем возьмем сечение $2-2$ в этой же струйке с площадью сечения Δw_2 и скоростью v_2 . Элементарный расход через сечение $2-2$ равен

$$\Delta Q_2 = v_2 \Delta w_2$$



Уравнение неразрывности движения жидкости

Но по свойству элементарной струйки приток и отток жидкости через ее боковую поверхность невозможен; на участке 1-2, который сохраняет неизменные размеры, не образуется пустот и не происходит переуплотнений; значит количества жидкости, протекающей в единицу времени через сечения 1-1 и 2-2, должны быть одинаковы, т.е.

принимая во внимание, что сечения 1-1 и 2-2 приняты произвольно, можно в общем случае для элементарной струйки написать

или

$$v_1 \Delta w_1 = v_2 \Delta w_2 = \dots = v_n \Delta w_n = \Delta Q = \text{const}$$

- уравнение неразрывности (сплошности) для элементарной струйки

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \dots = \Delta Q_n = \Delta Q = \text{const}$$

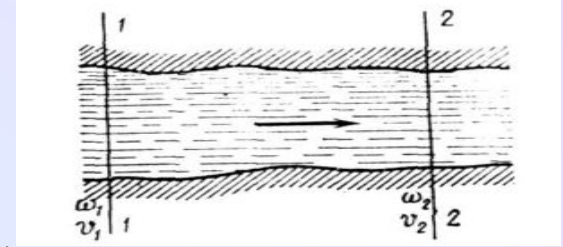
**- элементарный расход жидкости при установившемся движении
есть величина постоянная для всей элементарной струйки.**

Уравнение неразрывности при установившемся движении жидкости для потока жидкости.

Взяв в потоке два произвольных сечения 1-1 и 2-2 и представив живые сечения их состоящими из суммы элементарных струек, можно написать

$$Q_1 = \sum v_1 \Delta w_1 \quad \text{— расход жидкости в сечении 1-1;}$$

$$Q_2 = \sum_{w_1} v_2 \Delta w_2 \quad \text{— расход жидкости в сечении 2-2.}$$



Но поскольку скорости касательны к боковой поверхности потока, то в отсек между сечениями 1-1 и 2-2 через боковую поверхность *движения жидкости не происходит*; не изменяется и объем отсека. Следовательно, в участок через сечение 1-1 поступает столько же жидкости, сколько за то же время выходит .

Но так как сечения 1-1 и 2-2 взяты произвольно, то можно написать, что

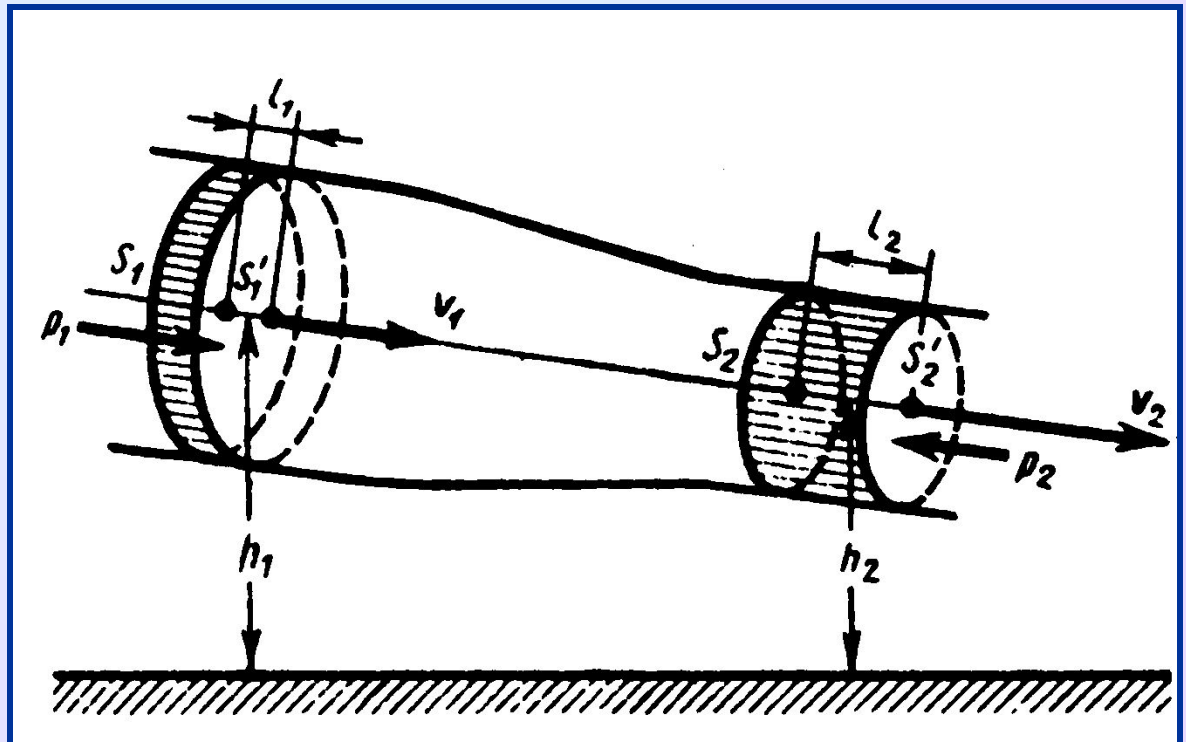
или, выражая расход жидкости в сечениях через среднюю скорость v , получим

-уравнение неразрывности для потока жидкости расход жидкости через любое сечение потока при установившемся движении есть величина постоянная.

Уравнение Бернулли для идеальной жидкости

Выделим в стационарно текущей идеальной жидкости (физическая абстракция, т.е. воображаемая жидкость, в которой отсутствуют силы внутреннего трения) трубку тока, ограниченную

сечениями S_1 и S_2 , по которой слева направо течет жидкость.



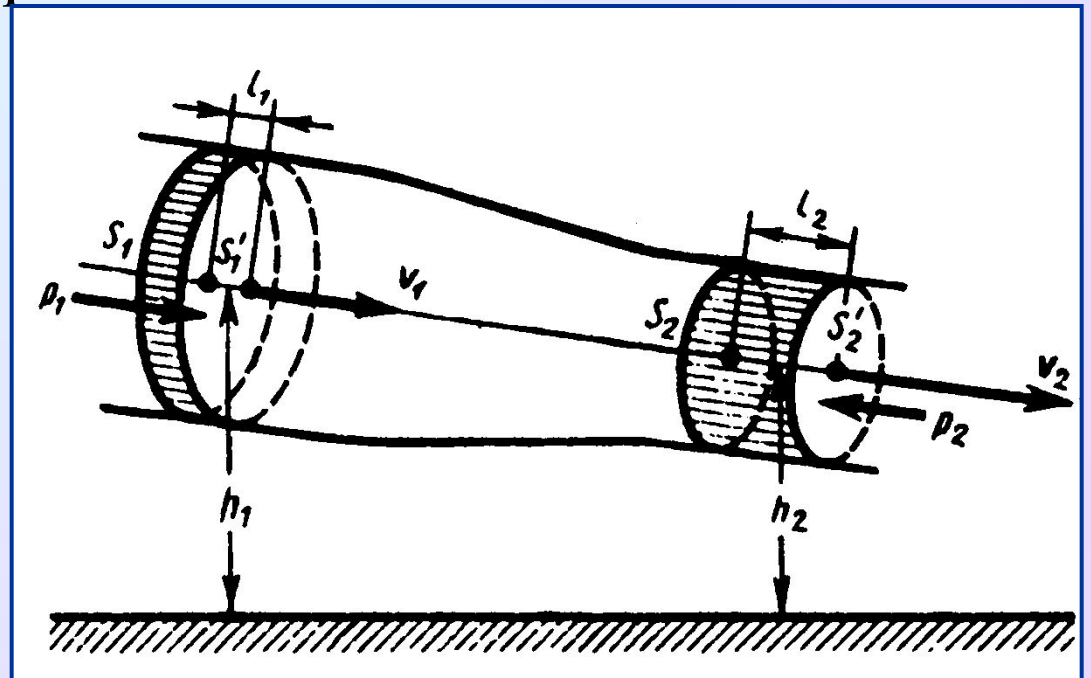
Пусть в месте сечения S_1 скорость течения \mathbf{v}_1 , давление p_1 и высота, на которой это сечение расположено, h_1 .

Аналогично, в месте сечения S_2 скорость течения \mathbf{v}_2 , давление p_2 и высота сечения h_2 .

За малый промежуток времени Δt

жидкость перемещается

от сечения S_1 к сечению S'_1 , от S_2 к S'_2 .

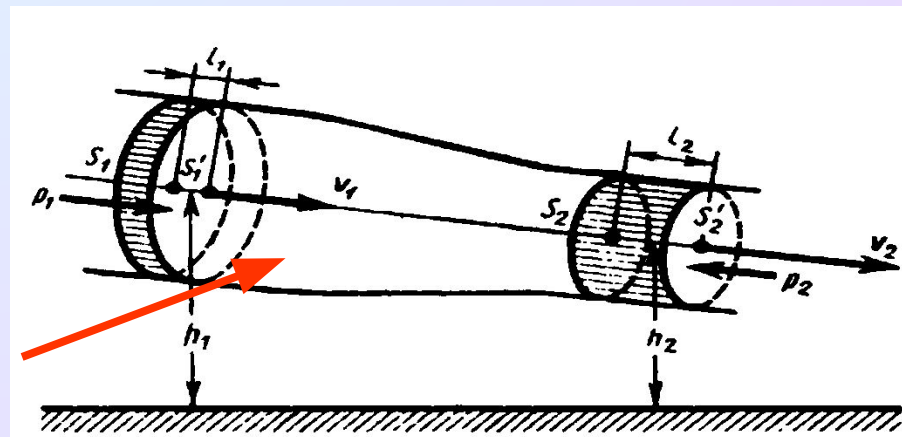


Согласно закону сохранения энергии, изменение полной энергии идеальной несжимаемой жидкости должно быть равно работе внешних сил по перемещению массы жидкости :

$$E_2 - E_1 = A$$

где E_1 и E_2 - полные энергии жидкости массой m в местах сечений S_1 и S_2 , соответственно.

Незаштрихованная область к изменению полной энергии отношения не имеет!

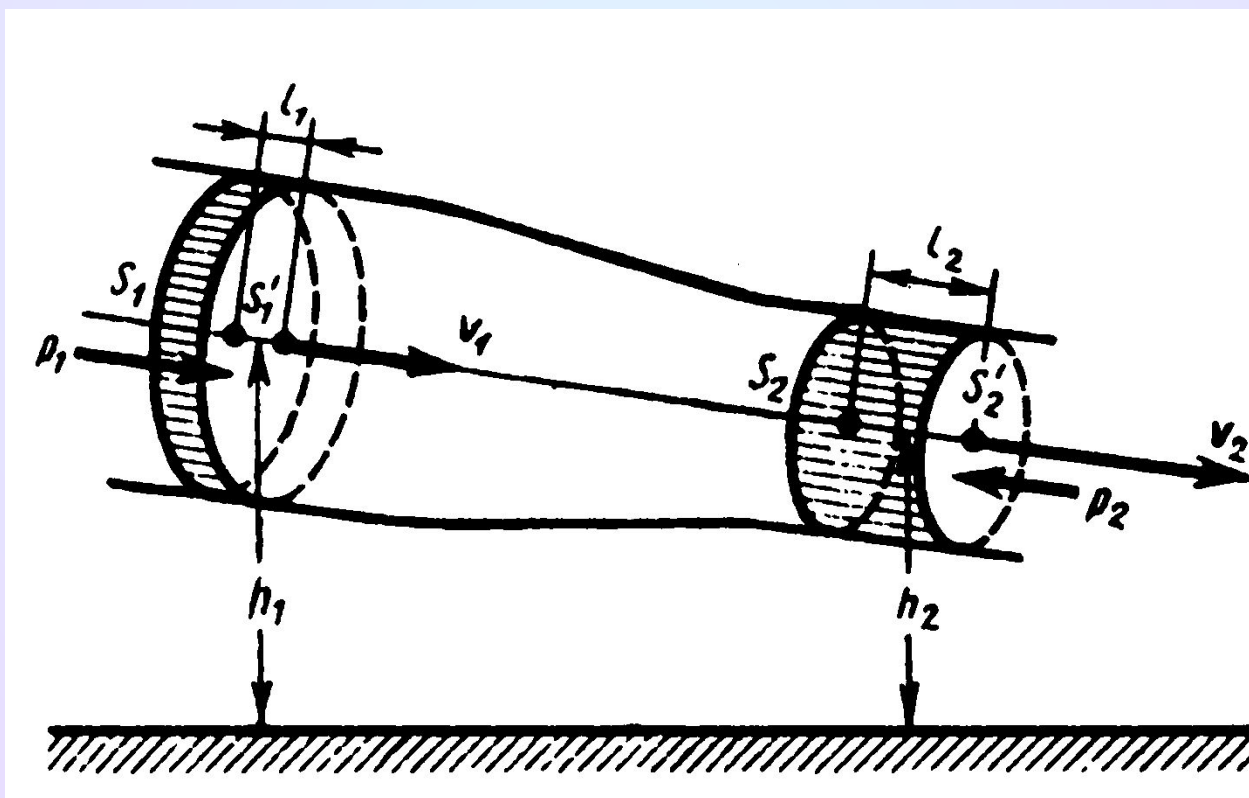


С другой стороны, A - это работа, совершаемая при перемещении всей жидкости, заключенной между сечениями S_1 и S_2 , за рассматриваемый малый промежуток времени Δt .

Для перемещения массы m от S_1 до S_1' жидкость должна переместиться на расстояние $l_1 = v_1 \cdot \Delta t$ и от S_2 до S_2' - на расстояние $l_2 = v_2 \cdot \Delta t$.

.

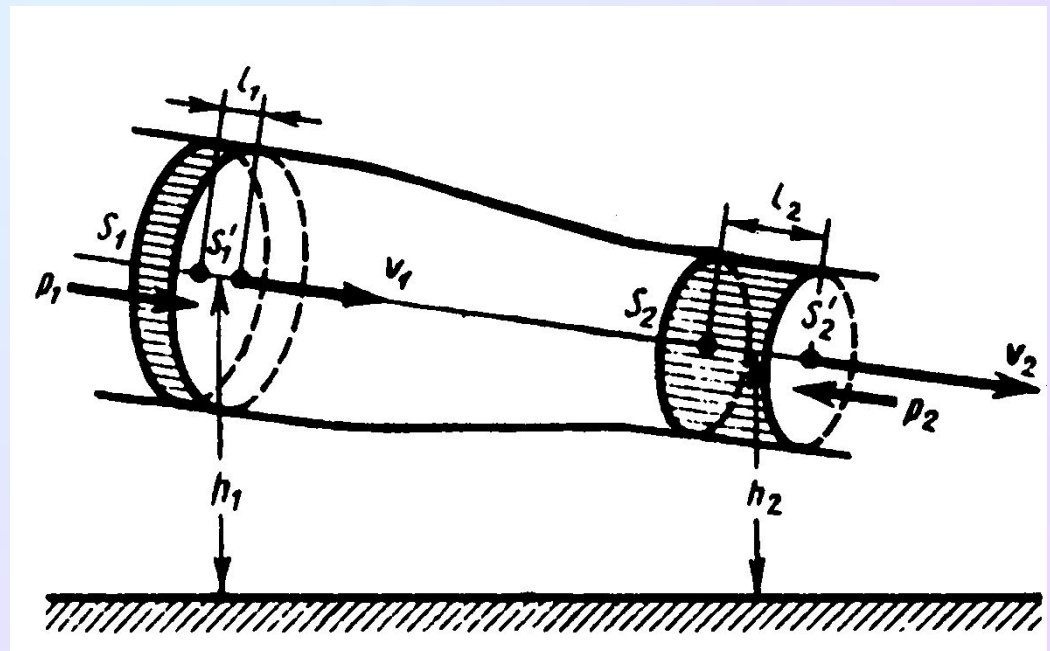
Отметим, что l_1 и l_2 настолько малы, что всем точкам объемов, закрашенных на рисунке, приписывают постоянные значения скорости v , давления p и высоты h



Следовательно,

$$A = F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2$$

где $F_1 = p_1 \cdot S_1$ и $F_2 = -p_2 \cdot S_2$
(отрицательна, так как
направлена в сторону,
противоположную
течению жидкости).



Полные энергии E_1 и E_2 будут складываться из кинетической и потенциальной энергий массы m жидкости:

$$E_1 = \frac{m v_1^2}{2} + mgh_1$$

$$E_2 = \frac{m v_2^2}{2} + mgh_2$$

Откуда

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

Согласно уравнению неразрывности для несжимаемой жидкости, объем, занимаемый жидкостью, остается постоянным, т.е. $\Delta V = S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t$.
Разделив выражение на ΔV , получим

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2$$

где ρ - плотность жидкости.

Так как сечения выбирались произвольно, то можно записать

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

Выражение называется **уравнением Бернулли**. Оно представляет собой закон **сохранение энергии** применительно к установившемуся течению идеальной жидкости. Оно хорошо выполняется и для реальных жидкостей, внутреннее трение которых не очень велико.

Величина p в формуле называется **статическим** давлением (давление жидкости на поверхность обтекаемого ею тела).

Величина $\frac{\rho \cdot v^2}{2}$ - **динамическое** давление.

Величина $\rho \cdot g \cdot h$ - **гидростатическое** давление.

Для горизонтальной трубки тока ($h_1 = h_2$)
уравнение принимает вид

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

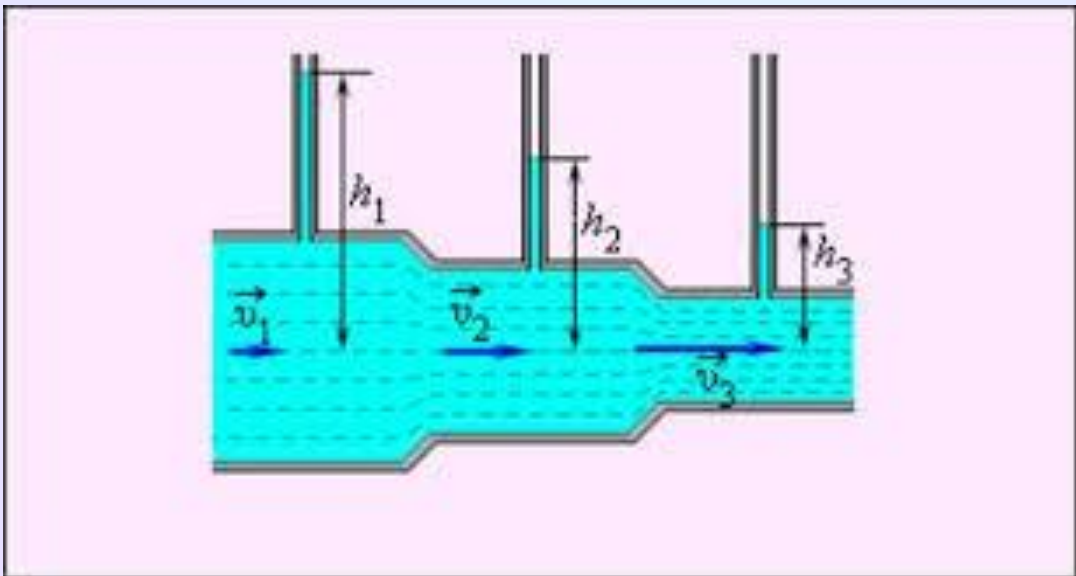
где $\frac{\rho v^2}{2} + p$ называется **ПОЛНЫМ ДАВЛЕНИЕМ**.

Следствия, вытекающие из уравнения Бернулли

Для горизонтально расположенной линии тока $h_2 = h_1$
справедливо:

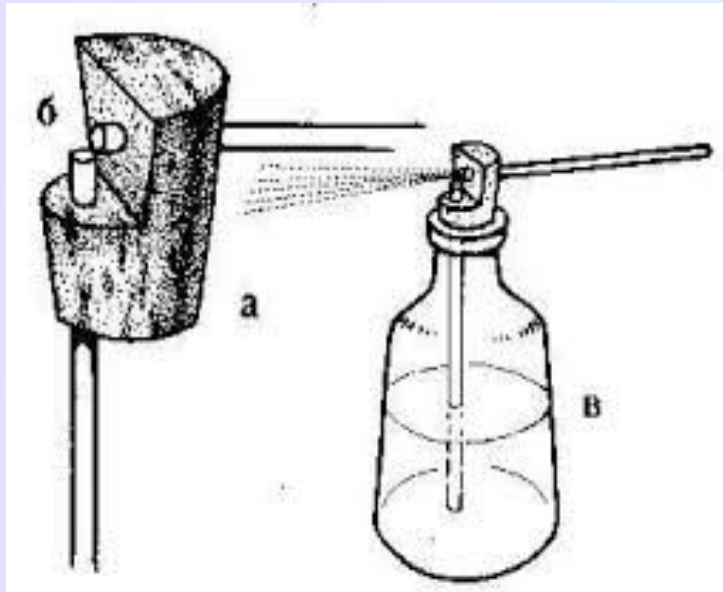
$$\left[\begin{array}{l} \frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 \quad \text{уравнение Бернулли} \\ S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad \text{уравнение неразрывности струи} \end{array} \right.$$

Если $S_2 > S_1$, то $v_2 < v_1$, следовательно $p_2 > p_1$



т.е давление меньше в тех точках, где скорость больше

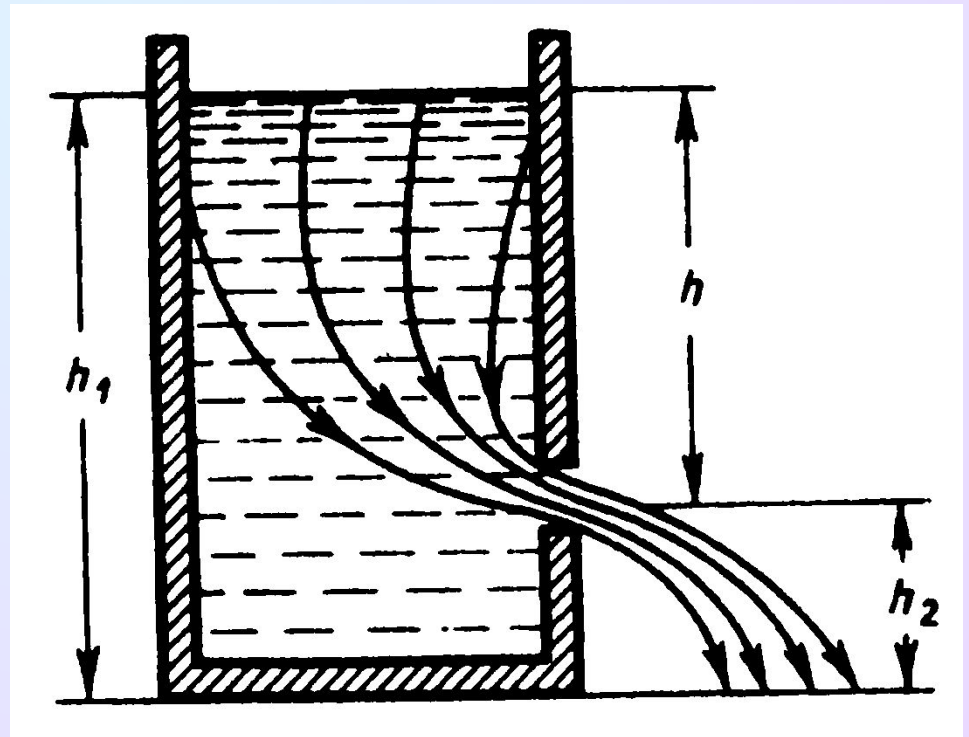
Следствия, вытекающие из уравнения Бернулли



Пульверизатор
Водоструйный насос
(самостоятельно)
Карбюратор
(самостоятельно)

Формула Торичелли

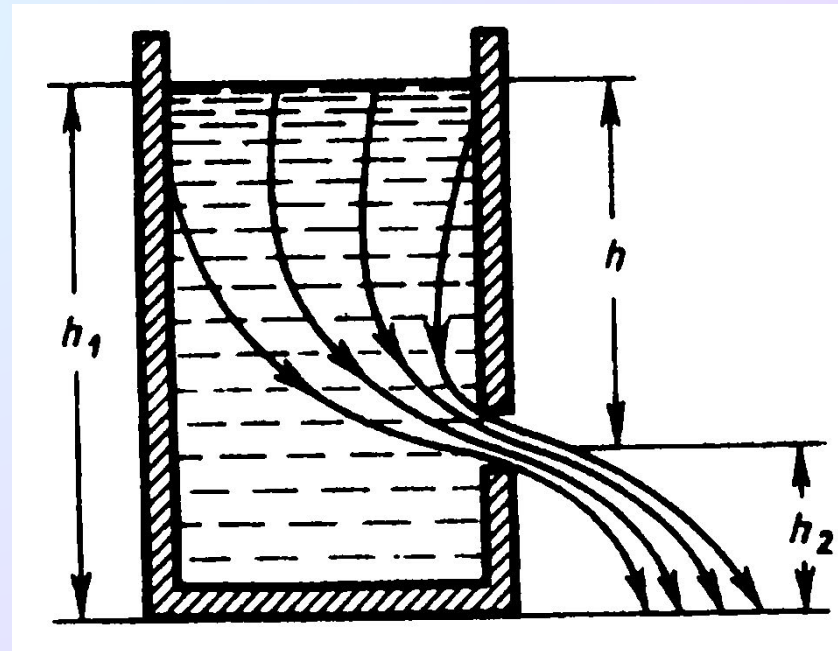
Уравнение Бернулли используется для нахождения скорости истечения жидкости через отверстие в стенке или дне сосуда. Рассмотрим цилиндрический сосуд с жидкостью, в боковой стенке которого на некоторой глубине ниже уровня жидкости имеется маленькое отверстие.



Рассмотрим два сечения (на уровне h_1 свободной поверхности жидкости в сосуде и на уровне выхода h_2 ее из отверстия) и напишем уравнение Бернулли:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2$$

Так как давления p_1 и p_2 в жидкости на уровне первого и второго сечений равны атмосферному, т.е. $p_1 = p_2$, то уравнение будет иметь вид



$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2$$

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

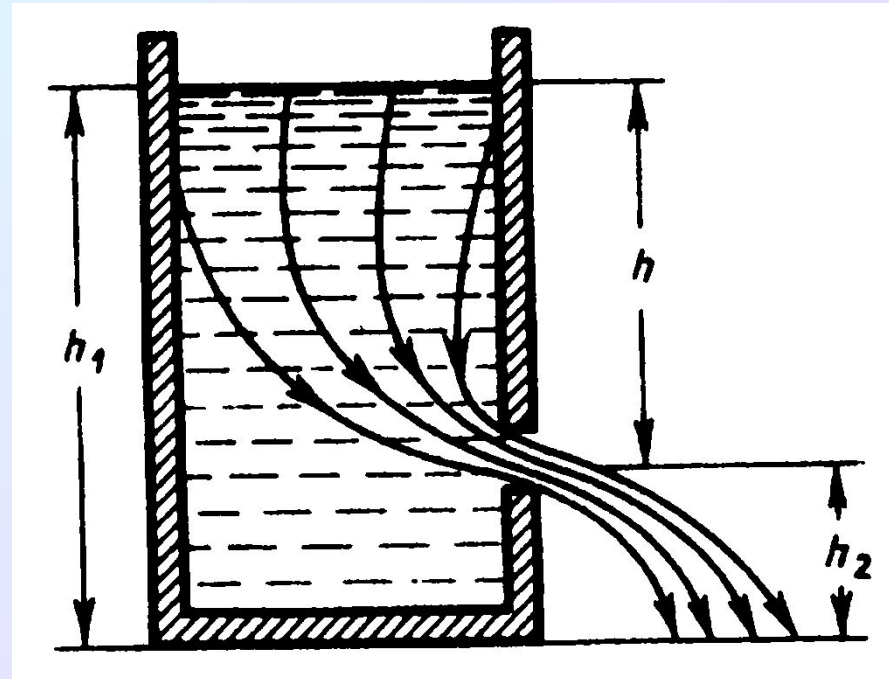
Из уравнения неразрывности следует, что

Если $S_1 \gg S_2$ то членом $\frac{v_1^2}{2}$ можно пренебречь и

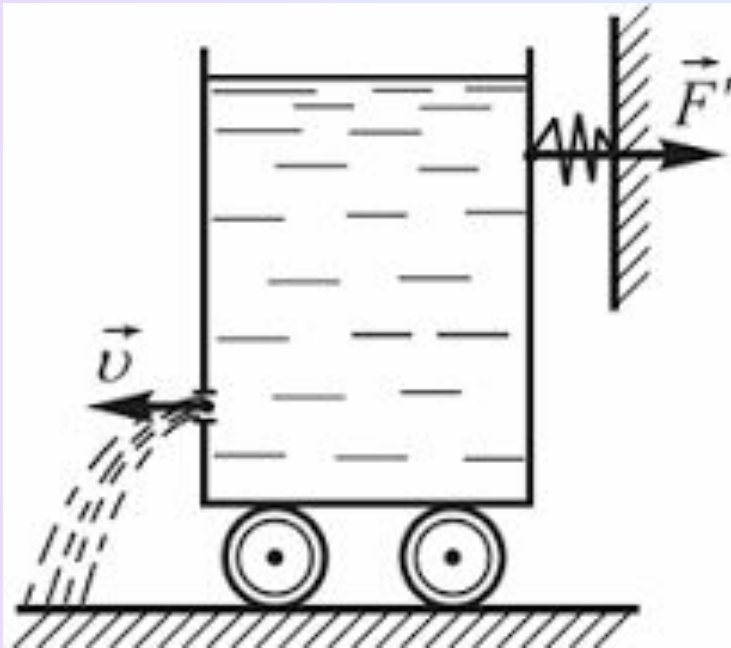
$$v_2^2 = 2g(h_1 - h_2) = 2gh$$

$$v_2 = \sqrt{2gh} \text{ - формула}$$

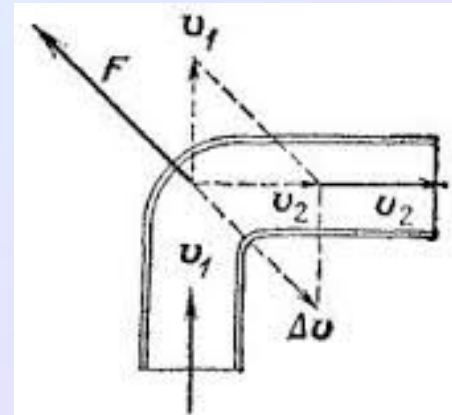
Торричелли



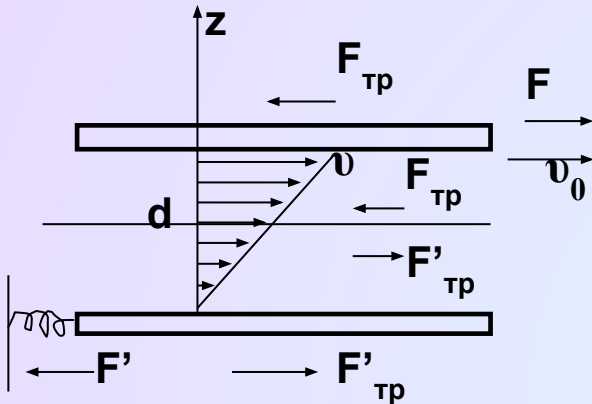
Реакция вытекающей струи



$$\vec{F}_A$$



Движение вязкой жидкости. Формулы Ньютона и Пуазейля



Идеальная жидкость, т.е. жидкость без трения, является абстракцией. Всем реальным жидкостям и газам присуща **вязкость или внутреннее трение**. Вязкость проявляется в том, что возникшее в жидкости (или газе) движение после прекращения действия причин его вызвавших, постепенно прекращается.

Варьируя скорость пластины v_0 , площадь пластин S и расстояние между ними d , экспериментально получили закон

$$v(z) = \frac{v_0}{d} z \quad F_{mp} = \eta \frac{v_0}{d} S = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S \quad (\text{Формула Ньютона})$$

показывает, как быстро изменяется скорость в направлении оси z , и называется **градиентом скорости** (это модуль вектора градиента скорости) (Формула Ньютона)

Единица вязкости $[\eta] = [\text{Па}\cdot\text{с}]$ это вязкость, при которой **градиент скорости** с модулем равным **1 м/с** на **1 м** приводит к возникновению **силы внутреннего трения** в **1 Н** на **1 м² поверхности** касания слоев.

Внутреннее трение связано с переносом импульса в направлении перпендикулярном движению.

Это приводит к уменьшению с течением времени величины **ρ** в направлении движения

Формула Стокса

Стокс установил, что при малых значениях Re сила сопротивления (сила трения) пропорциональна

- а) коэффициенту динамической вязкости η ,
- б) скорости (тела относительно жидкости) и
- с) характерному размеру тела l .

Для шара $l = r, k = 6\pi$

$$F = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

формула Стокса

Ламинарное и турбулентное течение



1. Ламинарное (слоистое)

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

$$Re < 1000$$

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

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

2. Турбулентное (вихревое)

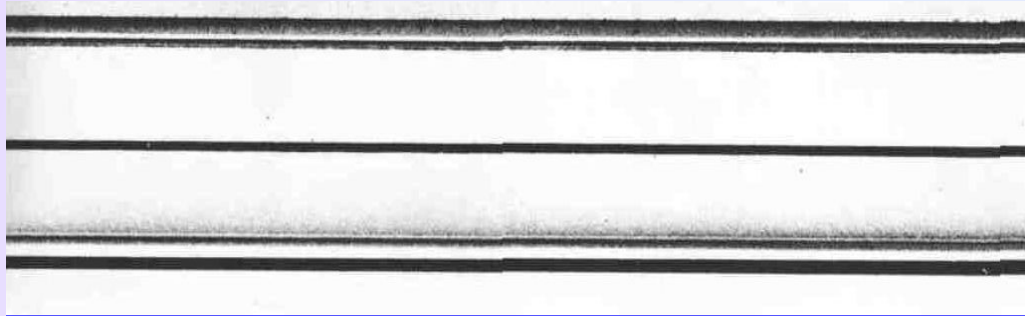
течение – происходит перемешивание слоев жидкости, вызванное появлением нормальной составляющей скорости частиц жидкости.

$$Re > 1000$$

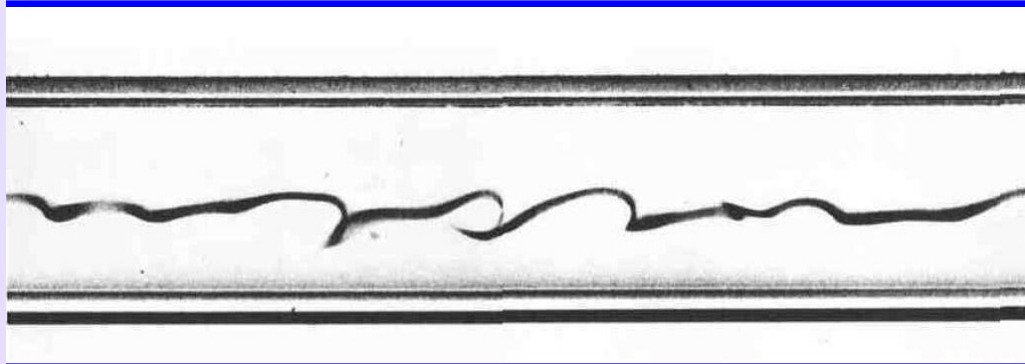
η/ρ - кинематическая вязкость

Эксперимент Рейнольдса с краской

Знаменитое исследование устойчивости течения в трубе, проведенное Осборном Рейнольдсом в 1883 г. в Манчестерском университете



Струйка подкрашенной воды, вводимая в ламинарный поток, остается невозмущенной по всей длине стеклянной трубки

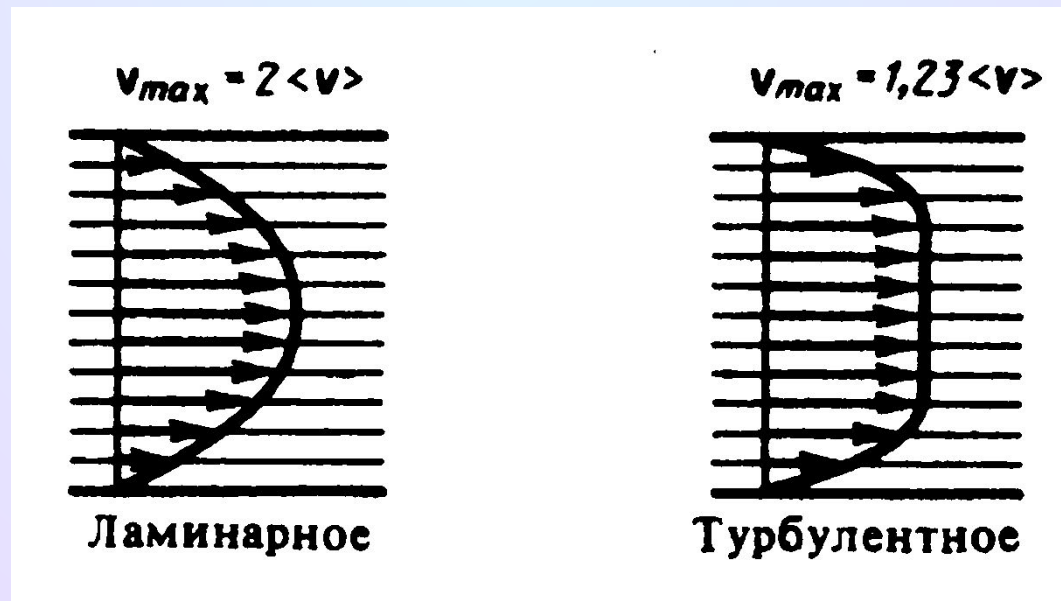


Скорость потока возросла, уже виден переход к турбулентному течению



Скорость потока возросла еще больше. Видно вполне развитое турбулентное течение

Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние от поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы.



При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скорости, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой.

Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидкости переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. Из-за большого градиента скоростей у поверхности трубы обычно происходит образование вихрей.

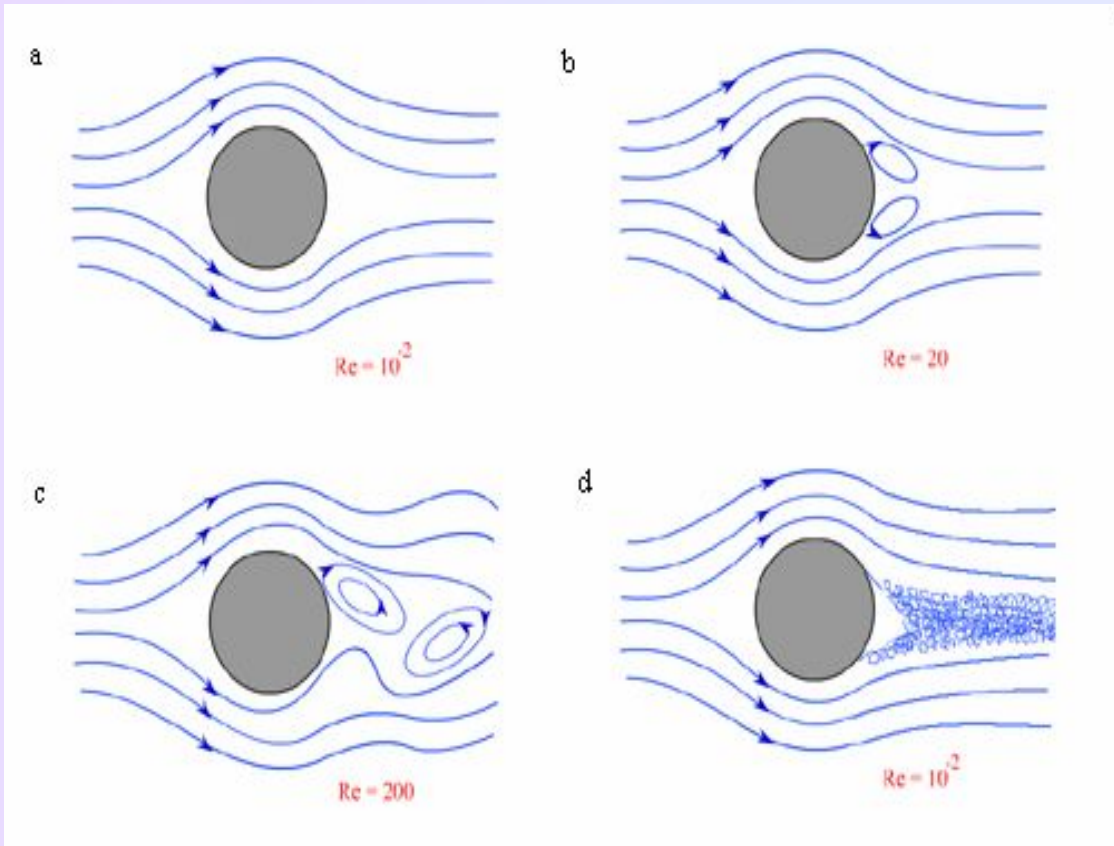
При малых значениях числа Рейнольдса ($Re \leq 1000$) наблюдается ламинарное течение.

Переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в области $1000 \leq Re \leq 1200$, а при $Re = 2300$ (для гладких труб) течение - турбулентное.

Если число Рейнольдса одинаково, то режим течения различных жидкостей (газов) в трубах разных сечениях одинаков.

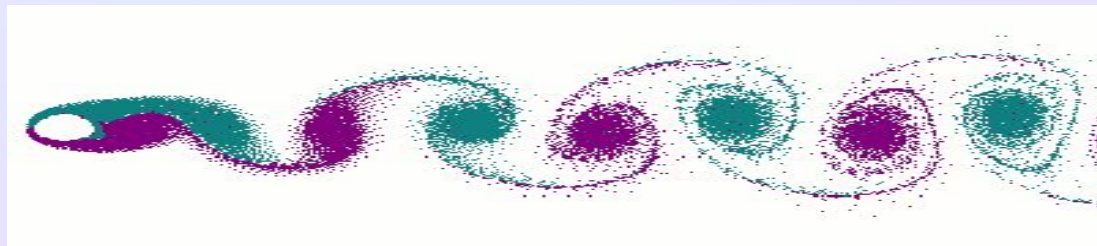
Движение тела в вязкой среде

Обтекание кругового цилиндра потоком жидкости



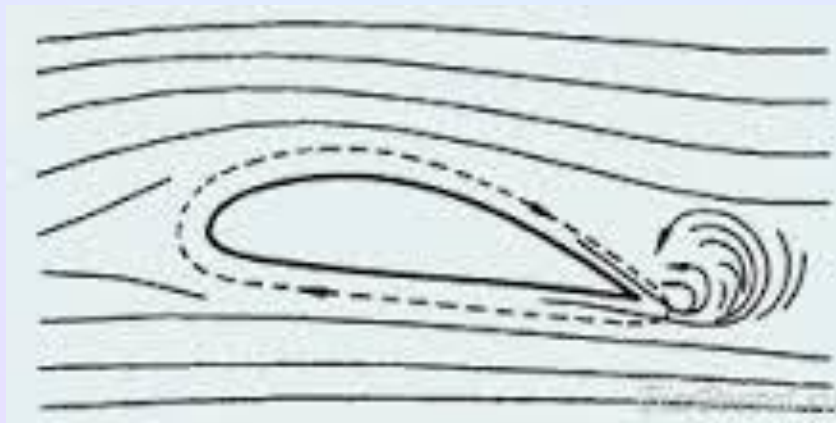
- a) ламинарный режим, $Re < 1$;
- b) первая стадия неустойчивости, $1 < Re < 40$;
- c) вторая стадия неустойчивости (вихревая дорожка), $Re > 40$;
- d) развитая турбулентность, $Re > 10^3$.

Вихревая дорожка при обтекании цилиндра

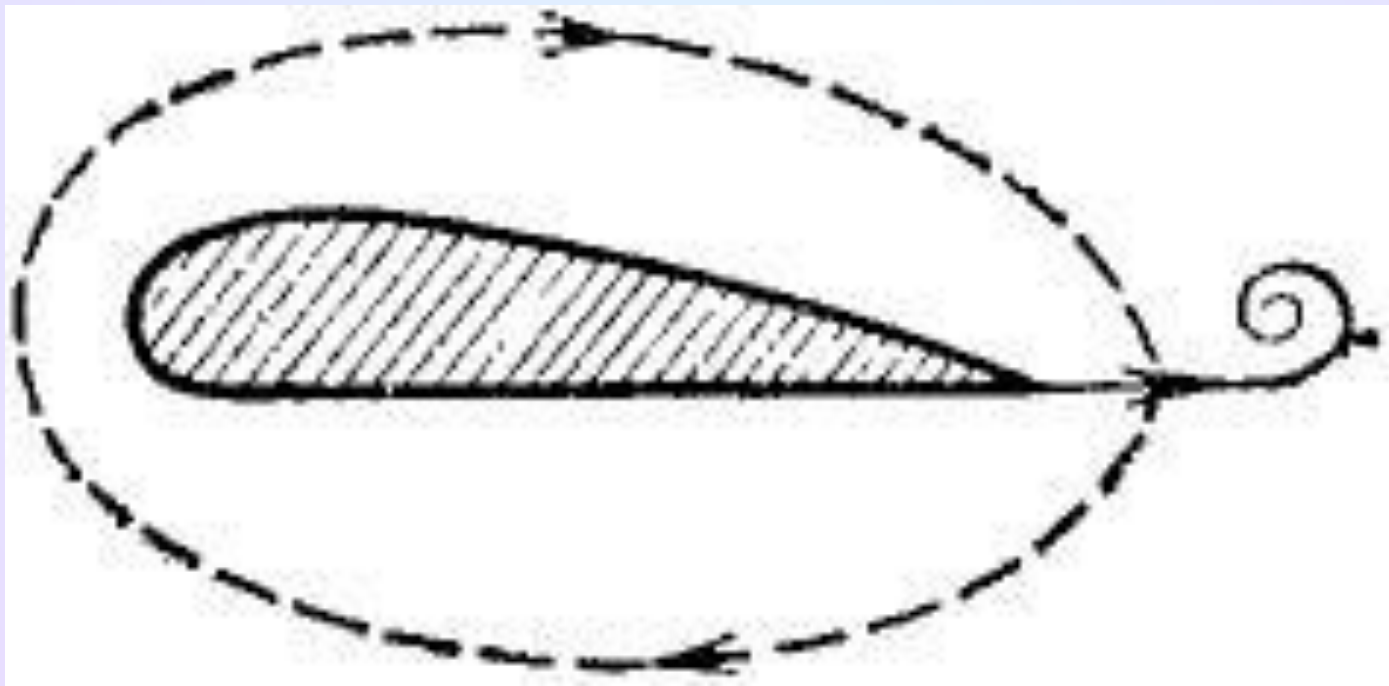


Подъемная сила

Рассмотрим теперь обтекание потоком воздуха крыла самолета. Опыт показывает, что, когда крыло помещено в поток воздуха, вблизи острой задней кромки крыла возникают вихри, вращающиеся в случае, изображенном на рисунке, против часовой стрелки. Вихри эти растут, отрываются от крыла и уносятся потоком.



Остальная масса воздуха вблизи крыла получает при этом противоположное вращение (по часовой стрелке), образуя циркуляцию около крыла



Накладываясь на общий поток, циркуляция обуславливает распределение линий тока, изображенное на рисунке.

