

Общая физика

Лекция 8 Гидродинамика

Трушин Олег
Станиславович
Зав. лаб. ЯФ ФТИАН РАН,
Доц. каф. нанотехнологии в
электронике ЯргУ

План лекции

- Механика сплошных сред и гидродинамика
- Поле скоростей и линии тока
- Трубки тока и неразрывность струи
- Уравнение Бернулли
- Истечение жидкости из отверстия
- Силы внутреннего трения
- Ламинарное и турбулентное течение
- Течение жидкости в круглой трубе
- Движение тел в жидкостях и газах
- Подъемная сила

Механика сплошных сред и гидродинамика

Механика сплошных сред охватывает гидродинамику, газодинамику, теорию упругости и др. науки

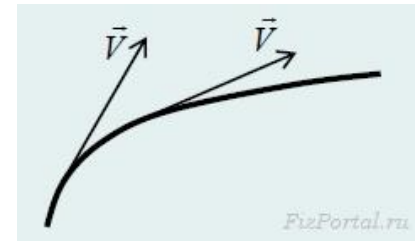
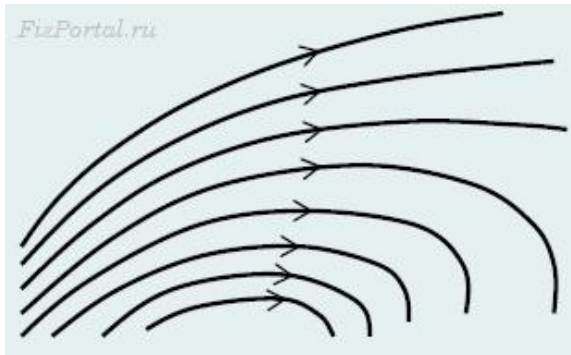
Гидродинамика изучает движение несжимаемых жидкостей и их взаимодействие с твердыми телами

Два способа описания движения жидкости:

- **метод Лагранжа** – задается положение каждой частицы как функция времени (**наблюдатель перемещается вместе с жидкостью**)
- **метод Эйлера** – задается скорость движения жидкости в неподвижных точках пространства (**наблюдатель неподвижен**)

Поле скоростей и линии тока

Поле скоростей – мгновенная картина распределения скоростей частиц жидкости.

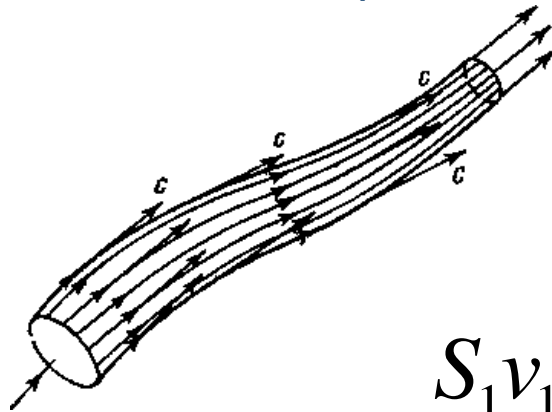


Линия, касательная к которой указывает направление скорости частицы, проходящей в рассматриваемый момент через точку касания называется **линией тока**.

Если поле скоростей (линии тока) **не изменяется со временем**, то такое течение называется **стационарным**

Трубки тока и неразрывность струи

Часть жидкости ограниченная линиями тока, называется **трубкой тока**



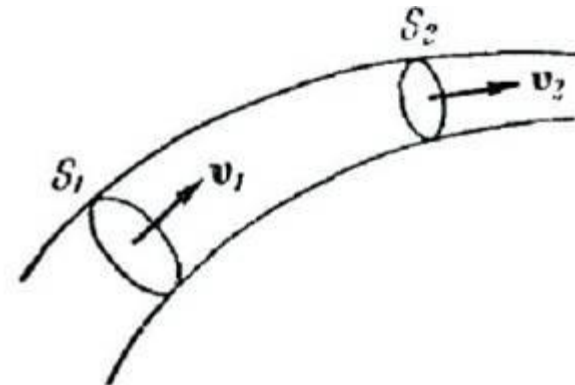
Частицы жидкости при своем движении не пересекают стенок трубки тока

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

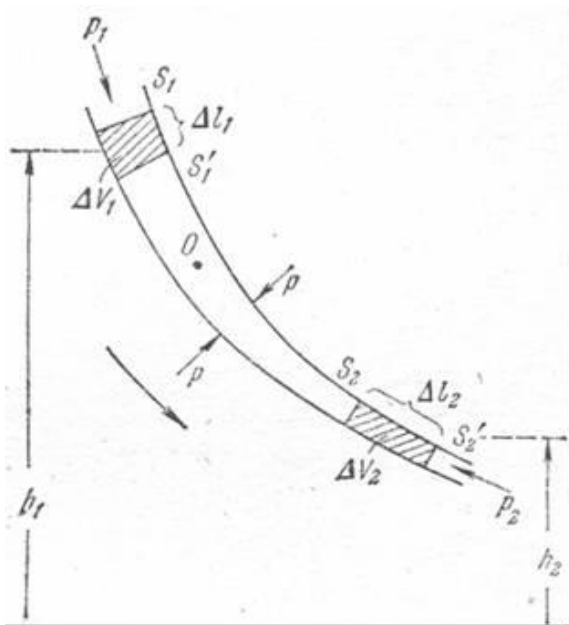
Для несжимаемой жидкости

Теорема о неразрывности струи

$$Sv = const$$



Уравнение Бернулли



Жидкость, в которой внутреннее трение отсутствует, называется **идеальной**

В стационарном течении идеальной жидкости приращение энергии ΔE выделенного объема можно вычислить как разность энергий заштрихованных объемов . ΔV_1 ΔV_2

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V \text{ неразрывность струи}$$

$$\Delta E = \left(\frac{\rho \Delta V v_2^2}{2} + \rho \Delta V g h_2 \right) - \left(\frac{\rho \Delta V v_1^2}{2} + \rho \Delta V g h_1 \right)$$

$$\Delta A = p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2 = (p_1 - p_2) \Delta V$$

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

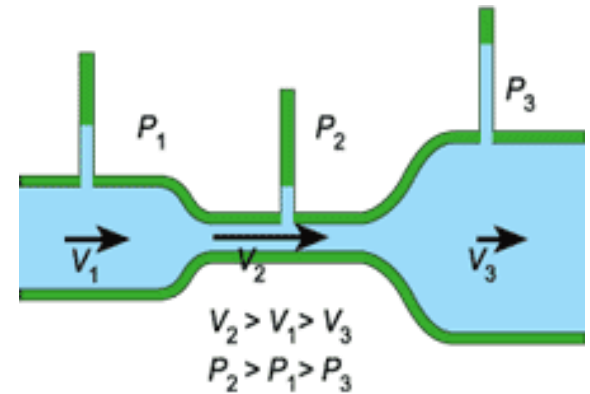
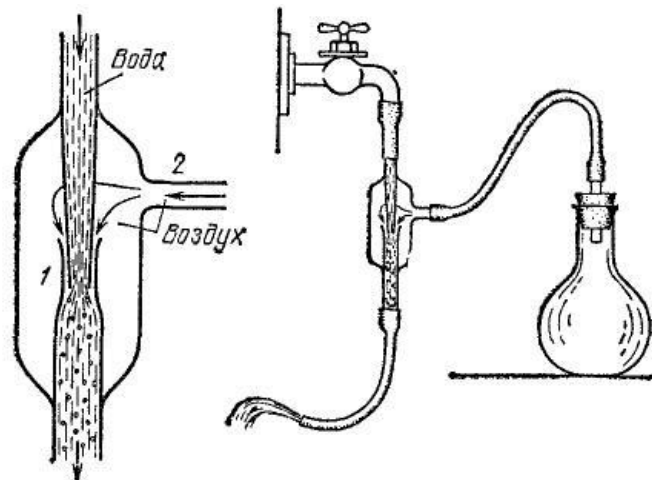
$$\boxed{\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = const}$$

Для горизонтальных линий тока

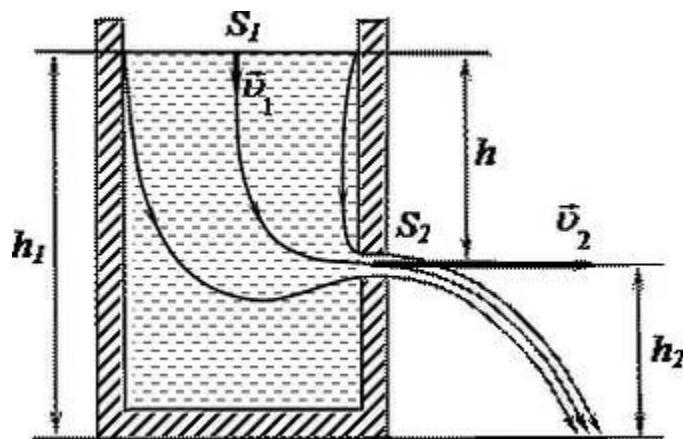
$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2$$

Давление меньше там где скорость больше

Водоструйный насос



Истечение жидкости из отверстия



$$p_1 = p_2 = p_0$$

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

$$v = \sqrt{2gh}$$

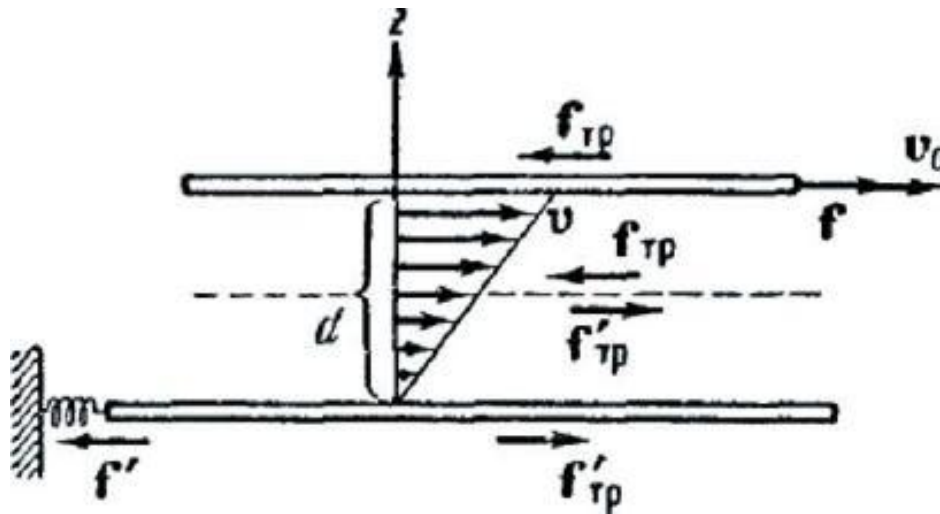
формула Торричелли

Силы внутреннего трения

Все реальные жидкости и газы характеризуются вязкостью

Вязкость проявляется в постепенном гашении движения

Рассмотрим опыт по измерению силы вязкого трения



$$f_{\text{тр}} = \eta \frac{v_0}{d} S$$

η -коэффициент
внутреннего трения
(вязкости)

$$f_{\text{тр}} = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S$$

- У жидкостей коэффициент вязкости η уменьшается с ростом T
- У газов наоборот растет

Ламинарное и турбулентное течение

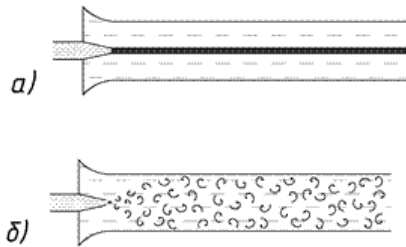
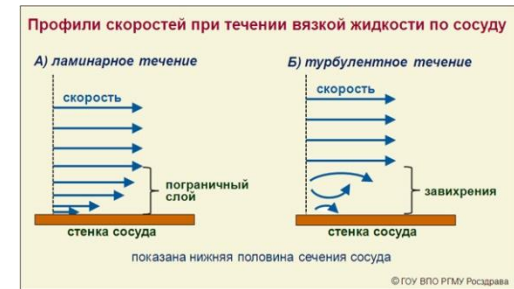


Рис. 4.5. Визуальное определение режимов течения жидкости

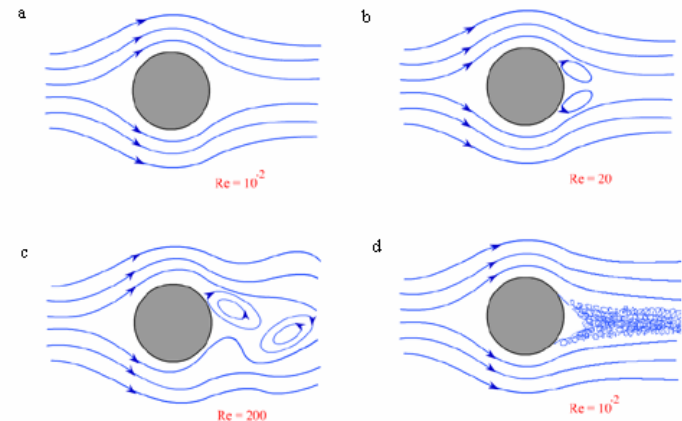
- **Ламинарным** называется слоистое течение жидкости без перемешивания
- **Турбулентным** называется течение, при котором происходит интенсивное перемешивание жидкости, наблюдается пульсация скорости и давления.



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

Число Рейнольдса:

- 1) Характер течения
- 2) Критерий подобия



Течение жидкости в круглой трубе

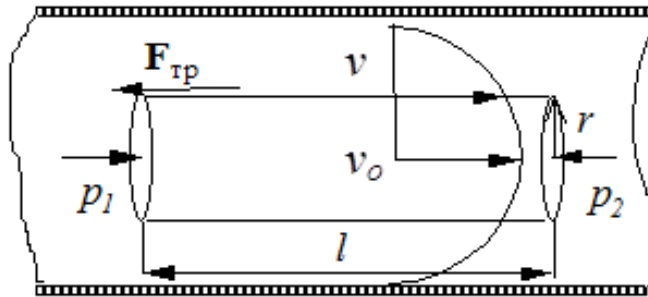


Рис. 5.4

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| 2\pi r l$$

$$\left| \frac{dv}{dr} \right| = -\frac{dv}{dr}$$

$$-\frac{dv}{dr} = \frac{(p_1 - p_2)r}{2\eta l}$$

$$dv = -\frac{(p_1 - p_2)r}{2\eta l} dr$$

$$v = -\frac{(p_1 - p_2)r^2}{4\eta l} + C$$

$$v(R) = 0$$

$$C = \frac{(p_1 - p_2)R^2}{4\eta l}$$

ламинарный режим

$$v(r) = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

$$v_0 = v(0) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} R^2$$



Поток жидкости в круглой трубе

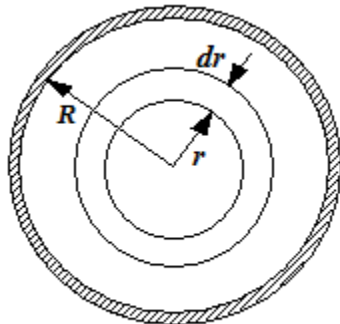


Рис.5.5

$$dQ = v(r)dS = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) 2\pi r dr$$

$$Q = \int_0^R v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) 2\pi r \cdot dr = \frac{1}{2} \pi R^2 v_0 = \frac{1}{2} S v_0$$

$$Q = \frac{(p_1 - p_2) \pi R^4}{8\eta l}$$

Формула Пуазейля

Можно использовать для определения коэффициента вязкости

Движение тел в жидкостях и газах I

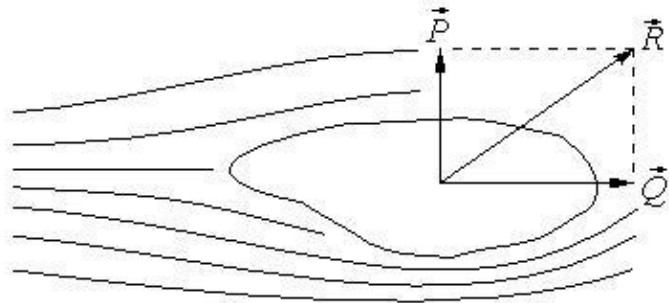
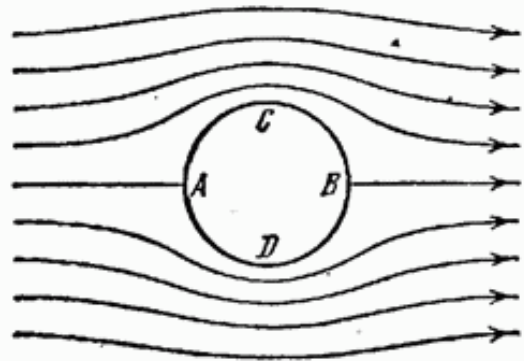


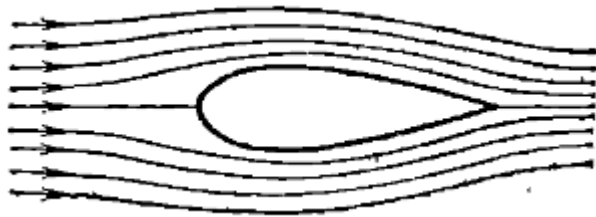
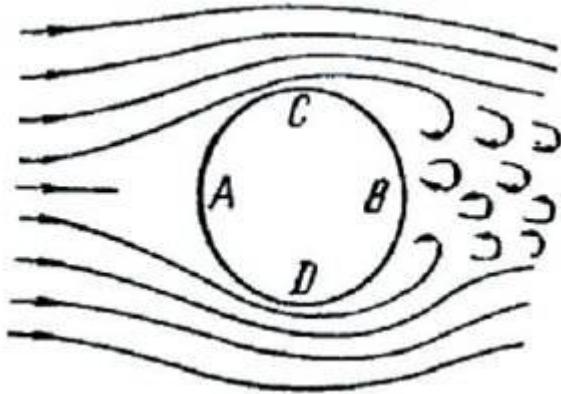
Рис.7.15

- P – подъемная сила
- Q – сила лобового сопротивления
- R – результирующая сила



- Для симметричного тела действует только лобовое сопротивление
- Для идеальной жидкости лобовое сопротивление равно нулю

Движение тел в жидкостях и газах II



- Сила трения приводит к образованию вихрей и возникновению разницы давлений
- Лобовое сопротивление складывается из сопротивления трения и сопротивления давления

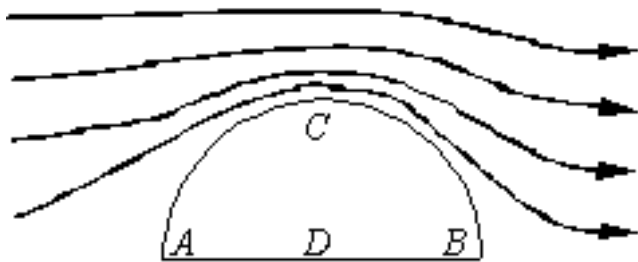
Наименьшее сопротивление у каплевидной формы

При малых Re
сопротивление трения

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

Формула Стокса

Подъемная сила



Оптимальная форма крыла по Жуковскому

