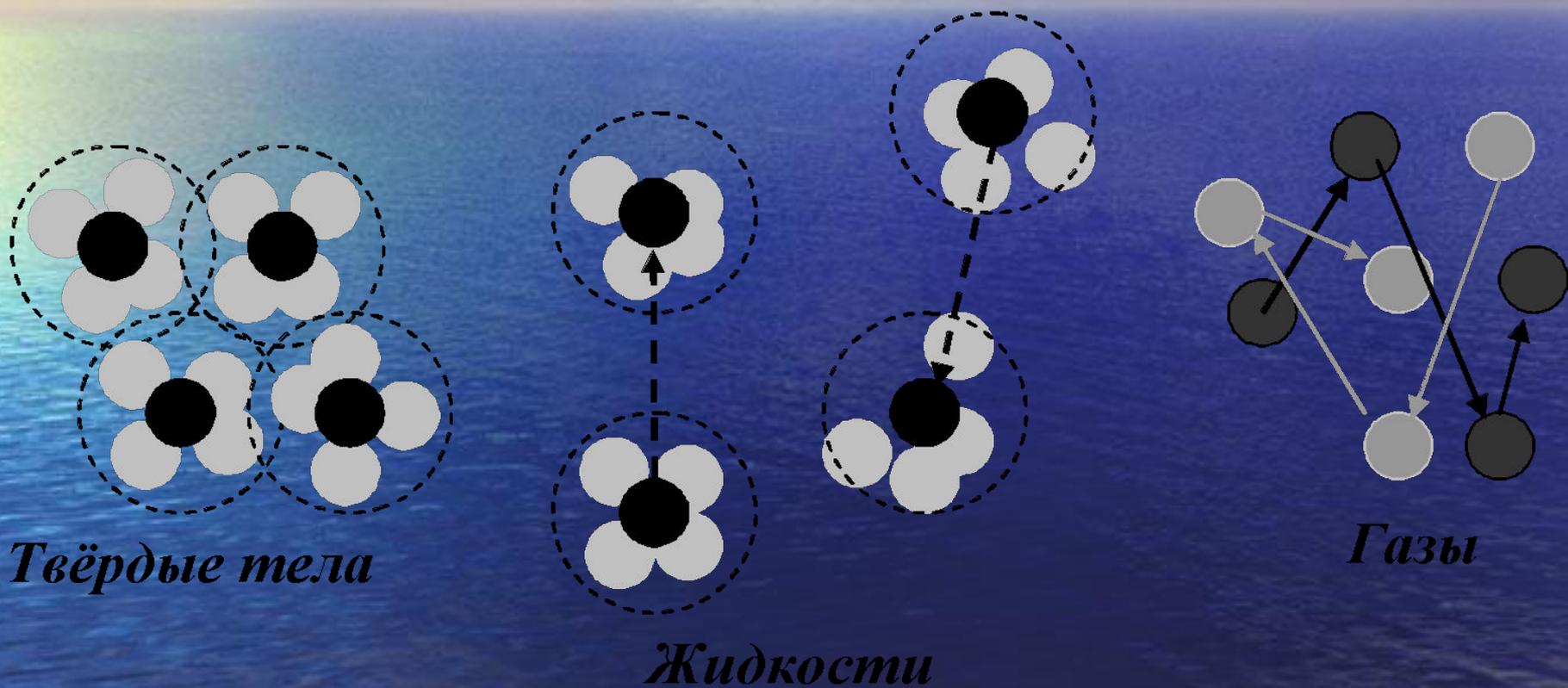


# ГИДРАВЛИКА

## Молекулярное строение



*Твёрдые тела*

*Жидкости*

*Газы*

Рисунок 1

## Предмет гидравлики

- Гидравлика— наука о движении и покое воды и других жидкостей. Жидкость в гидравлике представляют как сплошную среду, легко изменяющую форму под действием внешних сил.
- Сплошная среда— это масса, физические и механические параметры которой являются функциями координат в выбранной системе отсчета. Молекулярное строение жидкостей заменяется сплошной средой той же массы.

# Понятие жидкости. Свойства капельной, некапельной и идеальной жидкости

Жидкостью называется физическое тело, обладающее текучестью и не имеющее своей формы, но принимающее форму того сосуда, в котором оно находится.

Текучестью называется способность жидкости изменять свою форму, не дробясь на части, под действием даже небольших сил.

Различают два вида жидкостей:  
капельные и некапельные (газообразные).

- **Капельные жидкости:** оказывают большое сопротивление изменению объема и трудно поддаются сжатию.
- При изменении давления и температуры их объем изменяется весьма незначительно.
- Любая капельная жидкость может переходить в газообразное состояние при определенной температуре и давлении.
- Практически не оказывают заметного сопротивления растягивающим усилиям.
- Оказывают существенное сопротивление сдвигающим силам.

## Некапельные (газообразные) жидкости

- Изменяют свой объем в зависимости от этих же факторов в значительной степени.
- При понижении температуры и повышении давления могут переходить в жидкое состояние.

**Идеальная жидкость** — это жидкость, лишенная вязкости ( $\mu = 0$ ). Эту модель используют для упрощения расчетов в случае, когда силами вязкости можно пренебречь.

# ● Физические свойства жидкости

1 – Плотность  $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad [\rho] = \text{кг/м}^3$

$$\rho = \rho(p, T)$$

$$pV = nRT; \quad (n = m/M) \Rightarrow$$

$$\frac{p}{\rho} = R_0 T \quad (R_0 \text{ — универсальная газовая постоянная}) \quad R = 8,314 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$$

2 – Сжимаемость жидкости

определяется производной  $\partial p / \partial \rho$ ,

Несмотря на значительную сжимаемость газов по сравнению с жидкостями при скоростях в среде  $v < 0,1c$  ( $c$  — скорость звука в среде), при решении конкретных задач сжимаемостью можно пренебречь. Поэтому понятие “несжимаемая жидкость” нашло широкое применение.

$$\beta = -\frac{\Delta V}{V \Delta p} = \frac{\Delta \rho}{\rho \Delta p} \Rightarrow \beta = \frac{\partial \rho}{\rho \partial p} \quad E_0 = 1/\beta$$

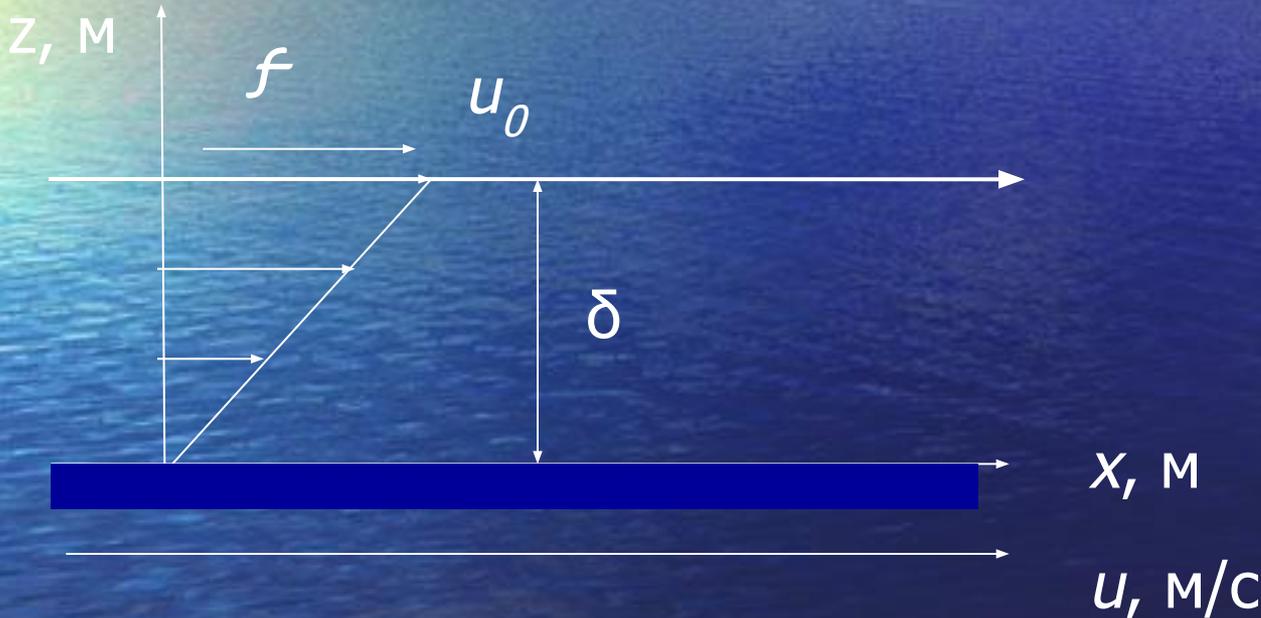
$$c = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} \Rightarrow c = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} \Rightarrow c = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}}$$

$$c_{\text{возд}} = 330 \text{ м/с}; \quad c_{\text{вод}} = 1414 \text{ м/с}; \quad \text{Ma} = u/c$$

скорость распространения малых возмущений давления в данной среде,

# ВЯЗКОСТЬ ИЛИ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ЖИДКОСТЯХ

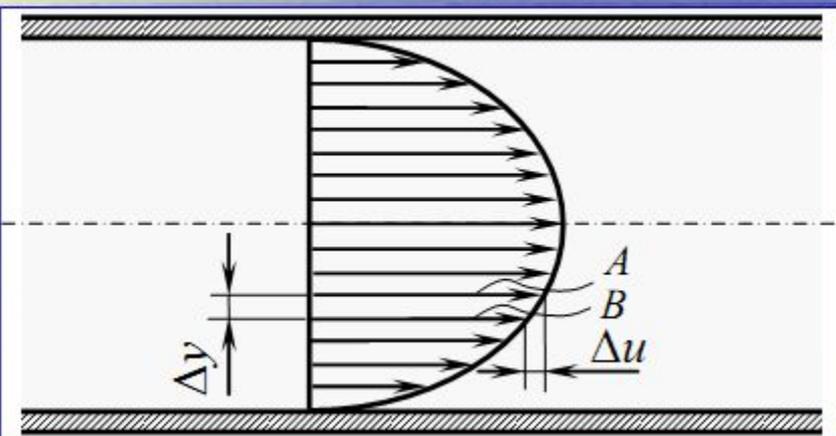
Характеризует ее способность сопротивляться сдвиговым усилиям.



$$f = \mu S u_0 / \delta$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dz}$$

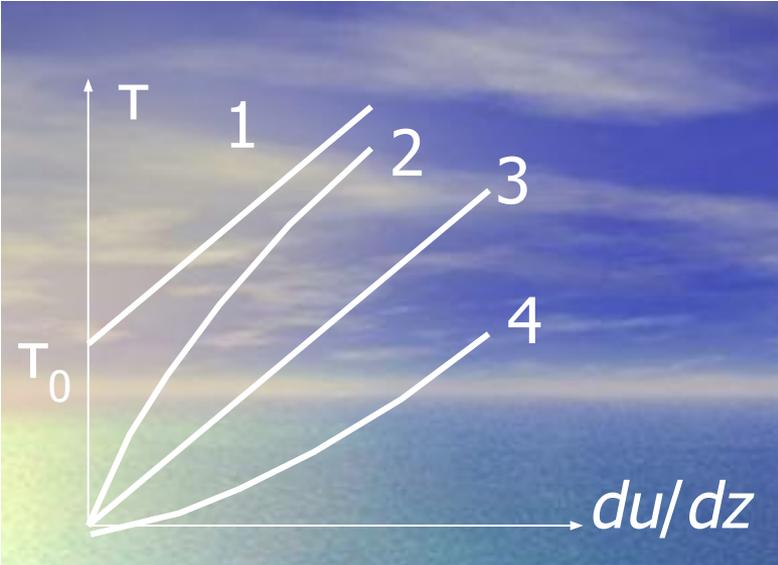
где  $\mu$  – коэффициент пропорциональности или динамический коэффициент вязкости.  
Единица измерения – Па·с; Пуаз (П):  
 $1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 10 \text{ П}$



На практике чаще используется  
***кинематический коэффициент вязкости***

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

$$1 \text{ стокс} = 1 \frac{\text{пуаз}}{\text{г/см}^3} = 1 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$



3

$$\tau = \mu \frac{du}{dz}$$

ньютоновская (вода, керосин, спирт, газы)

1

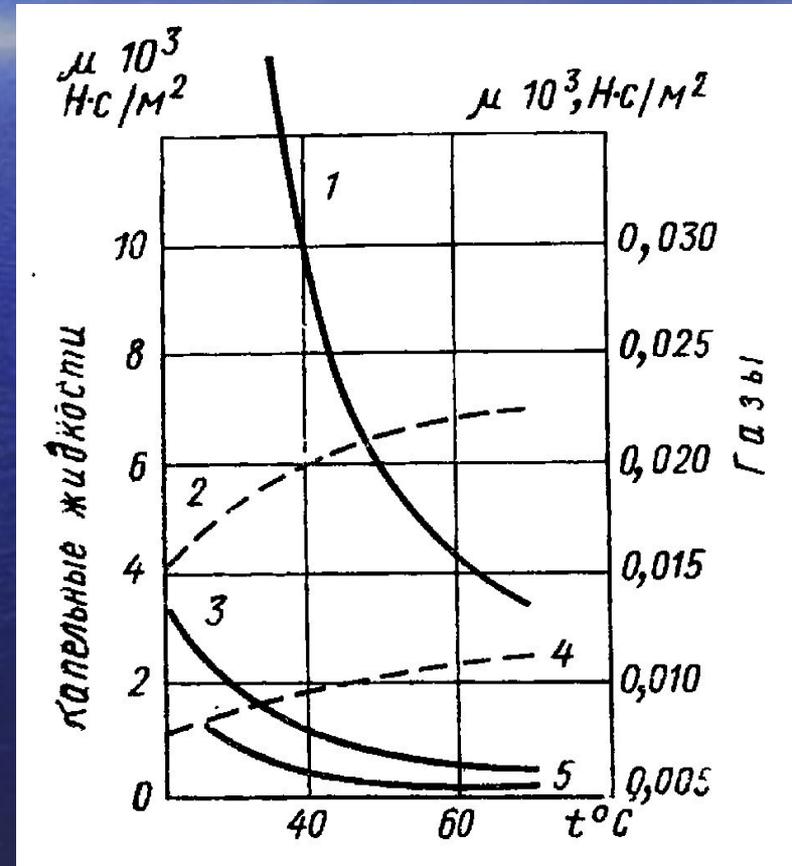
$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dz}$$

вязкопластическая или бингамовская (глинистые и цементные р-ры; пасты; пена; масл. краски)

2, 4

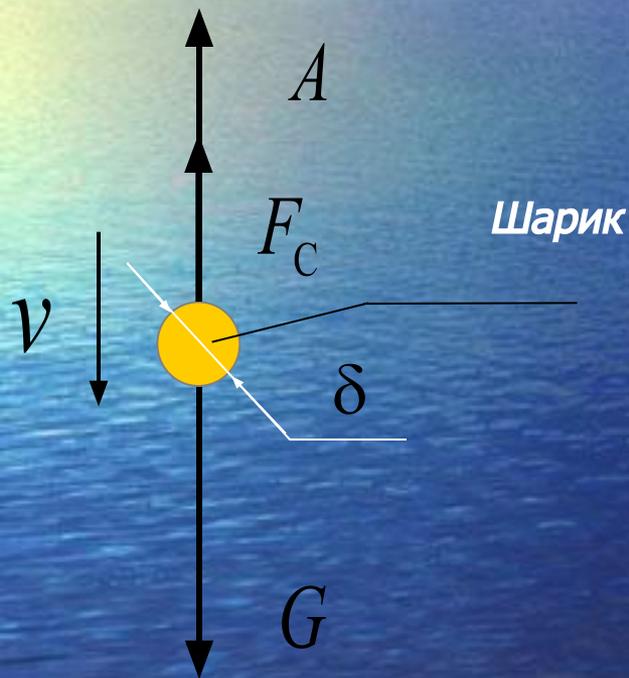
$$\tau = C \left( \frac{du}{dz} \right)^n$$

2 – псевдопластическая (суспензии из ассим. част.; р-ры полимеров; еллоулоза);  
4 – дилатантная (клейстер, крахмал)



1 – масло; 2 – воздух; 3 – керосин; 4 – водород; 5 – вода

Вязкость жидкости определяется экспериментально с помощью приборов, которые называются вискозиметрами. Примером такого прибора может служить вискозиметр Стокса.

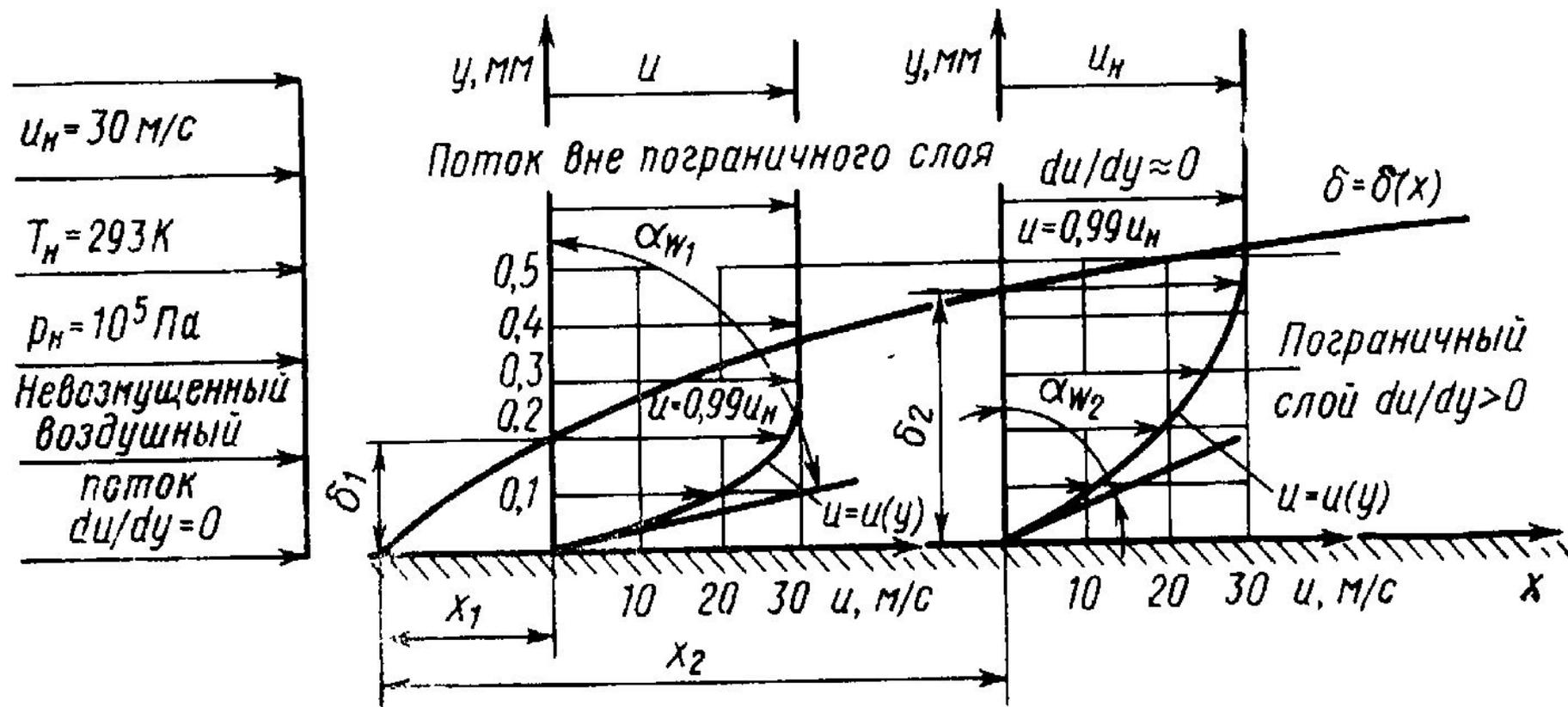


$$G = \rho_{\text{ш}} W g, \quad A = \rho_{\text{ж}} W g,$$

$$F_C = (\sigma + \tau) \pi \delta^2 = 3\pi \mu \nu \delta$$

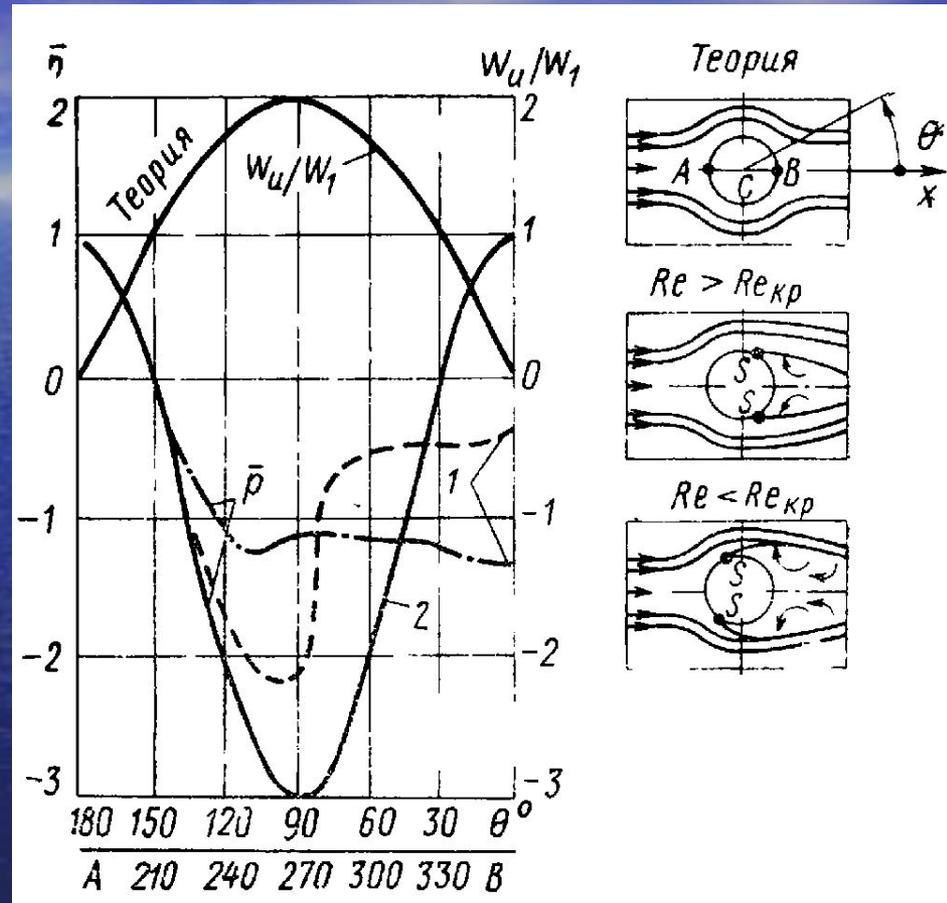
$$\mu = \frac{1}{18} g \delta^2 \frac{1}{v} (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})$$

С вязкостью связано возникновение динамического пограничного слоя при обтекании жидкостями твердых тел.



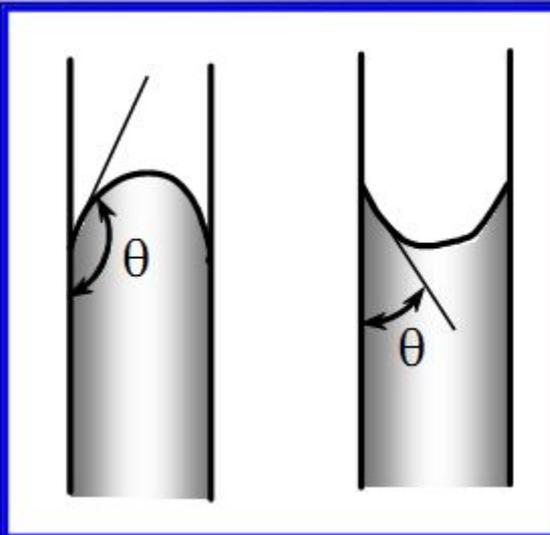
# Парадокс Даламбера

В силу полной симметрии распределения давления по поверхности цилиндра равнодействующая сил давления равна нулю. Полученный вывод называется парадоксом Даламбера: при дозвуковом безотрывном обтекании тел идеальной жидкостью сила лобового сопротивления равна нулю: сила трения отсутствует, а вторая составляющая — сила сопротивления давления, действующая на переднюю часть шара, уравнивается силой давления на кормовую часть. Парадокс состоит в несоответствии этого вывода с экспериментальными данными — при обтекании тел реальными жидкостями всегда возникает сила лобового сопротивления



## Поверхностное натяжение

Коэффициент поверхностного натяжения –  $\sigma^*$ , Н/м.  
Физический смысл – это свободная потенциальная энергия единицы поверхности раздела, обусловленная действием сил притяжения на молекулы вблизи поверхности раздела



## Капиллярные явления

На поверхности раздела трех фаз: твердой стенки, жидкости и газа образуется краевой угол  $\theta$ . Величина угла зависит только от природы соприкасающихся сред, и не зависит от формы сосуда и силы тяжести.

$$\Delta p = \sigma^* \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow \Delta p = \frac{4\sigma^*}{d}$$

# Давление насыщенных паров $p_n$

Характеризует испаряемость жидкостей. Зависит от температуры  $T$ . Эта величина определяет то минимальное абсолютное давление, при котором жидкость не теряет своей сплошности.

**местное нарушение сплошности течения** с образованием паровых и газовых пузырей (каверн), обусловленное местным падением давления в потоке, называется **кавитацией**.

Кавитация сопровождается характерным шумом, а при длительном её воздействии также и **эрозионным разрушением** твёрдых, как правило, металлических стенок. Последнее объясняется тем, что конденсация пузырьков пара (и сжатие пузырьков газа) происходит со значительной скоростью, частицы жидкости, заполняющие полость конденсирующегося пузырька, устремляются к его центру и в момент завершения конденсации вызывают местный гидравлический удар, т. е. значительное местное повышение давления. Разрушение материала при кавитации происходит не там, где выделяются пузырьки, а там, где они конденсируются вследствие длительного воздействия знакопеременных сил.

Кавитация в обычных случаях явление нежелательное.

При кавитации также возрастает сопротивление трубопроводов и, следовательно, уменьшается их пропускная способность.

# ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕМАТИКИ ЖИДКОСТИ

Метод Эйлера заключается в непосредственном описании поля скоростей в пространстве и времени, т. е.

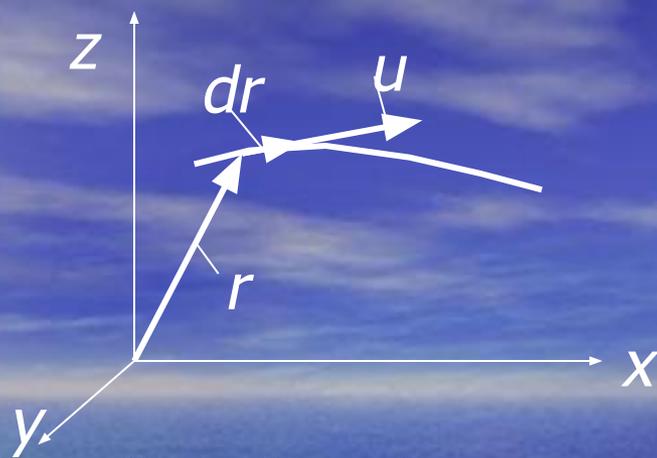
$$\vec{u} = \vec{u}(\vec{r}, t)$$

или  $u_x = u_x(x, y, z, t); u_y = u_y(x, y, z, t); u_z = u_z(x, y, z, t)$

Если  $\partial u / \partial t = 0$  или, иначе,  $u = u(x, y, z)$ , то движение называют установившемся или стационарным

Если  $\partial u / \partial t \neq 0$ , то неуставившемся или нестационарным

Линия тока — это линия, в каждой точке которой в данный момент времени вектор скорости  $u$  направлен по касательной, т. е.



$$\vec{u} \times d\vec{r} \Rightarrow \vec{u} \times d\vec{r} = 0 \Rightarrow$$

$$(u_y dz - u_z dy)i + (u_z dx - u_x dz)j + (u_x dy - u_y dx)k = 0$$

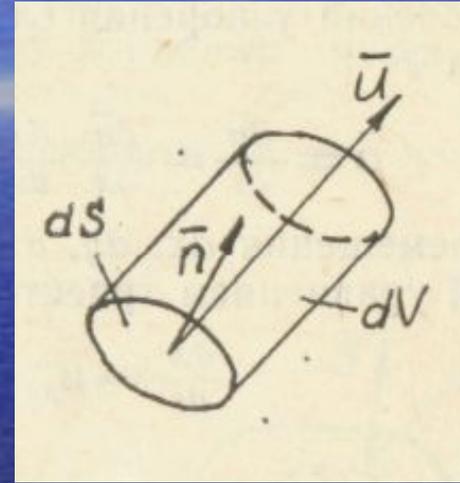
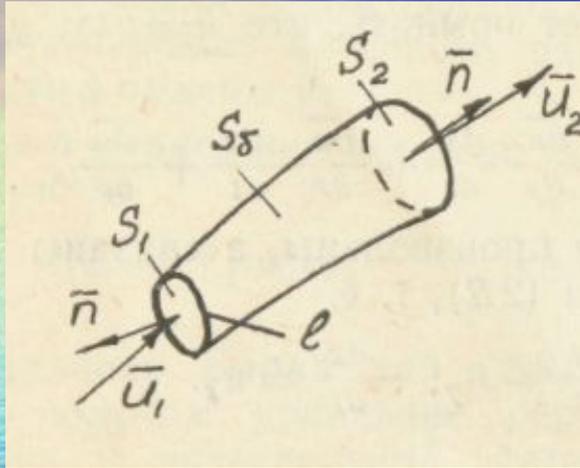
$$\frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z}$$

Траектория – кривая, вдоль которой происходит перемещение частицы жидкости, т. е.

$$d\vec{r} = \vec{u} dt \Rightarrow dx = u_x dt; \quad dy = u_y dt; \quad dz = u_z dt$$

$$dt = \frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z}$$

Трубка тока. Если через каждую точку произвольного контура / провести линии тока, то получим трубчатую поверхность, называемую трубкой тока. Если контур / мал, то трубка тока называется элементарной.



Объемный расход жидкости через произвольное сечение  $ds$  с нормалью элементарной трубки тока вычислим из простых рассуждений: объем жидкости, прошедший через сечение  $ds$  за время  $dt$ , равен объему цилиндра

$$\vec{u} \cdot \vec{n} ds dt = dV,$$

т. е. расход

$$dQ = dV / dt = \vec{u} \cdot \vec{n} ds = u_n ds = u ds_n$$

$$ds_n = ds \cdot \cos(\vec{u}, \vec{n})$$

площадь сечения, перпендикулярная линиям тока, или  
«живое сечение»

$$dG = \rho \vec{u} \cdot \vec{n} ds = \rho u_n ds = \rho u_n ds_n$$

Объемный и массовый расходы жидкости через произвольную площадку  $S$  найдем, просуммировав расходы по элементарным пронизывающим ее трубкам, т. е. объемный расход

$$Q = \int_S u_n ds \quad G = \int_S \rho u_n ds$$

Средняя расходная скорость  $V$  в живом сечении  $S_n$

$$v = Q/S_n$$

# Ускорение при движении жидкости

$$\vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt} = u_x \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + u_y \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} + u_z \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$$

$$a_x = \frac{du_x}{dt} = u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_x}{\partial t}$$

# СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЖИДКИЙ ОБЪЕМ

Внешние силы, действующие на жидкий объем и определяющие его движение, разделяются на **массовые (объемные) и поверхностные.**

Массовые силы  $R_m$  приложены ко всем жидким частицам, составляющим жидкий объем. К ним относятся силы тяжести и силы инерции.

Напряжением или плотностью, или удельной (единичной) массовой силой ( $\text{м/с}^2$ ,  $\text{Н/кг}$ ) называют

$$\vec{F} = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{R}_m}{\Delta m}; \quad \vec{G} = m\vec{g}; \quad \vec{F} = m\vec{a}$$

$$\vec{F} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}; \quad Z = -g$$

Поверхностные силы  $R_s$  представляют воздействие внешней среды на поверхность выделенного объема. Это воздействие распределено по поверхности непрерывно.

Выберем на плоскости  $S$ , рассекающей некоторую массу жидкости на части 1 и 2 (рис. 1.1), элементарную площадку  $\Delta S$ , на которой лежит точка  $A(x, y, z)$ . Отбросим часть 2 и заменим ее действие на площадку  $\Delta S$  части 1 равнодействующей поверхностных сил  $\Delta R_s$ . В общем случае величина  $\Delta R_s$  зависит от ориентации площадки  $\Delta S$  и направлена к ней под острым углом  $\gamma$ . Ориентация площадки  $\Delta S$  определяется единичным вектором внешней нормали  $n$ .

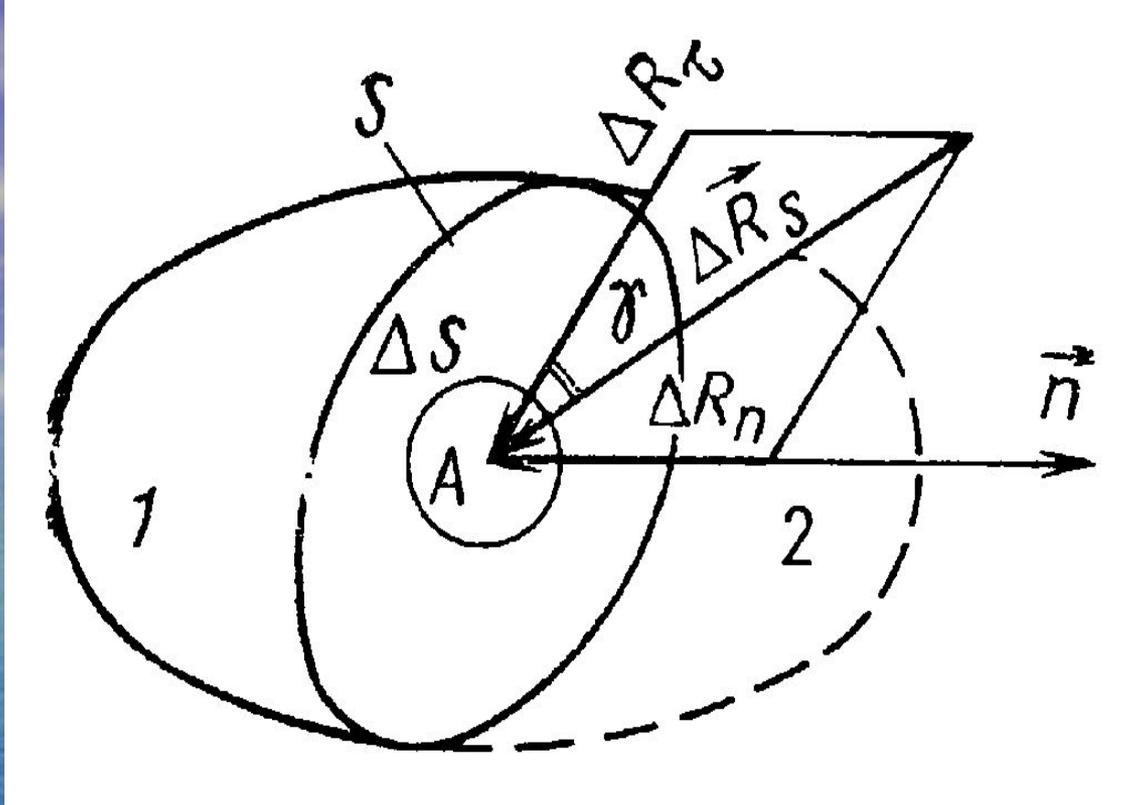


Рисунок 1.1

Нормальная составляющая  $\Delta R_n$  поверхностной силы  $\Delta R_S$  действует по нормали к поверхности  $\Delta S$ , противоположно  $n$ . Сила трения или тангенциальная составляющая  $\Delta R_\tau$  действует в плоскости  $\Delta S$ .

Плотность поверхностных сил на площадке с нормалью  $n$  называется напряжением и определяется выражением

$$p_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta R_S}{\Delta S}; \quad [p_n] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} =$$

При этом различают следующие напряжения.

$$p_n = p_{nn} n + p_{n\tau} \tau$$

Компоненты напряжения на площадках, нормальных к координатным осям, называются основными. Так, например, напряжение на площадке с нормалью, совпадающей с направлением оси  $x$ , может быть выражено через основные компоненты напряжения в виде

$$p_x = \sigma_x i + \tau_{xy} j + \tau_{xz} k$$

