

Лекция 3.

Особенности молекулярного строения жидкостей.

Поверхностные явления.

Гидростатика.

Законы гидродинамики.

Вязкость жидкости.

Связь с последующей деятельностью

Изучение курса «Биофизика»:

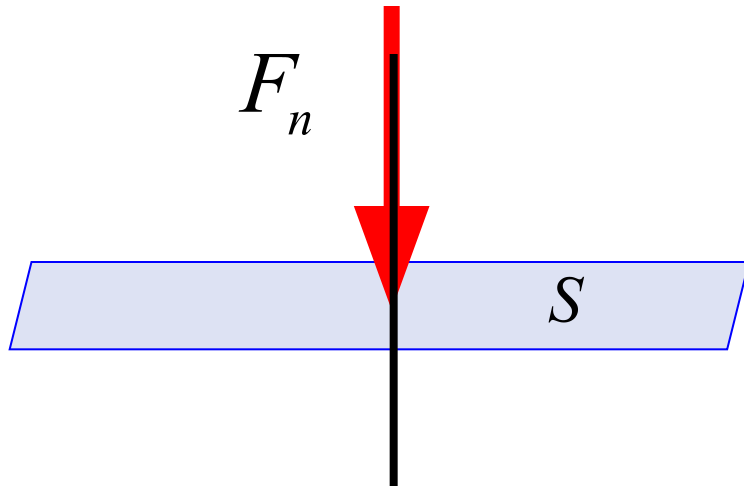
1. Гемодинамика
2. Биофизика дыхания

Практическое применение:

1. Пульмонология
2. Гематология

Начальные понятия:

Давление силы на поверхность



$$p = \frac{F_n}{S}$$

$$[p] = \frac{H}{m^2} = Па$$

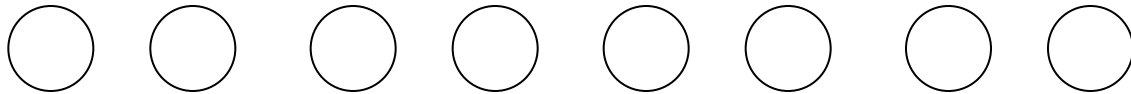
Сила давления на
поверхность
независимо от
природы силы:

*перпендикулярна
поверхности тела
в любой точке тела*

$$F_{\partial} = pS$$

Действует на тело
«снаружи»

Характер теплового движения молекул жидкости.
Силы взаимодействия между молекулами велики



10^{13} колебаний в секунду

Свойства жидкостей:

1. Сохраняют объем

2. Не сохраняют форму (текучи)

3. В толще жидкости возникают упругие деформации
только растяжения — сжатия

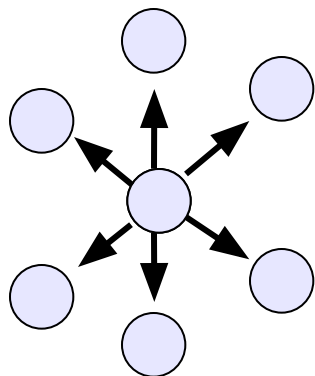
Идеальная жидкость:

1. Изотропность всех физических свойств
2. Абсолютная несжимаемость
3. Абсолютная текучесть
(отсутствие сил внутреннего трения)

Гидростатика

Рассматривается жидкость в состоянии *покоя*

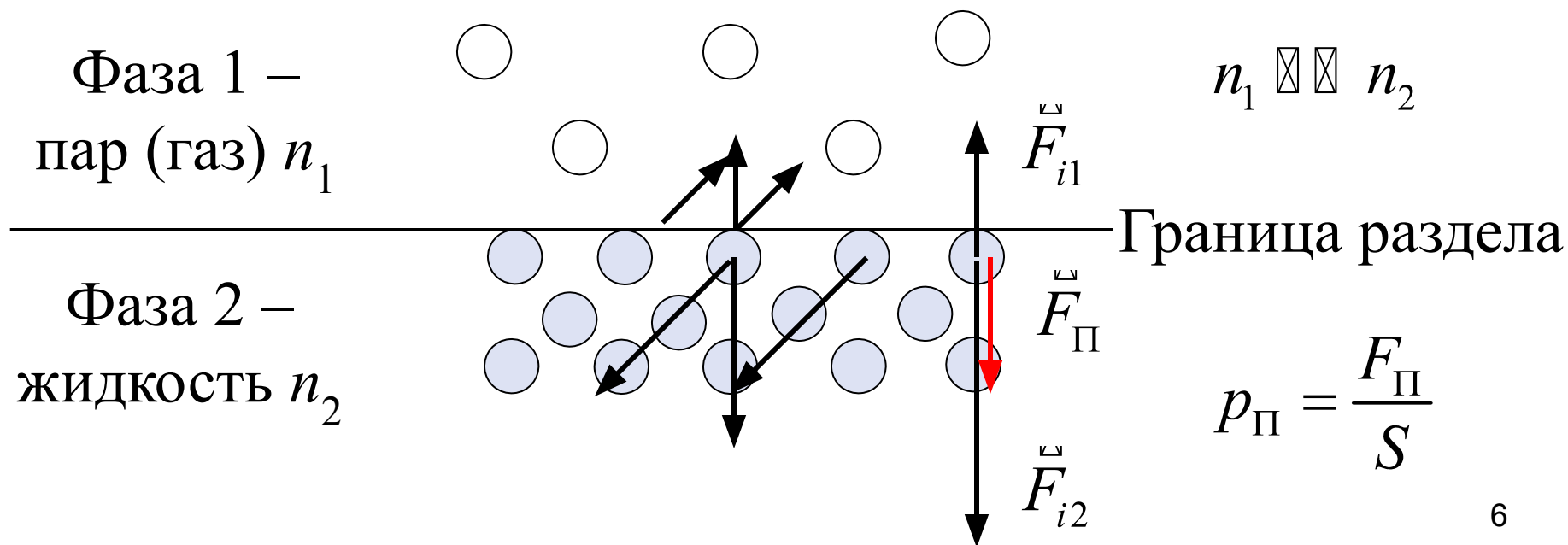
Жидкость считается сплошной средой, состоящей из частиц с размерами много большими молекулярных



Внутри жидкости

Силы, действующие на частицу со стороны других частиц компенсируют друга → частица покоится

Поверхностный слой жидкости



Поверхность жидкости ведет себя подобно пленке из упругого материала, стремящейся максимально уменьшить площадь поверхности жидкости

$$p_{\Pi} = \frac{F_{\Pi}}{S}$$

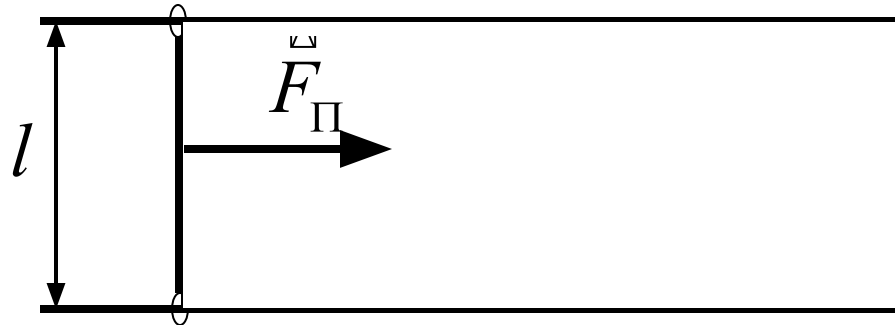
Характеристика поверхностных свойств жидкости — коэффициент поверхностного натяжения:

Численно равен работе по изотермическому образованию единицы поверхности:

$$\sigma = \frac{A_{\text{жс}}}{S} [\sigma]_M^H = \frac{H}{2} = \text{---}$$

Поверхность жидкости

Мыльная пленка ($\text{H}_2\text{O} + \text{ПАВ}$):



Подвижная
перемычка

Мыльная
пленка

Рамка

$$F_{2\Pi} = 2 l$$

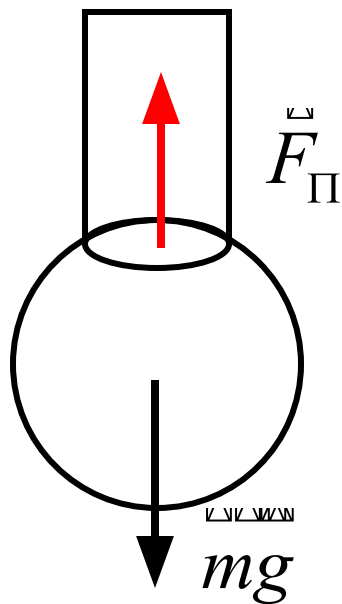
$$\sigma = \frac{F}{l}$$

Сила F поверхностного натяжения, действующая на участок (контур), ограничивающий поверхность жидкости

Следствия:

1. Состояние невесомости $\rightarrow$ поверхность жидкости — сфера (минимальная площадь поверхности для данного объема)

2. Образование капель на конце капилляра при вытекании из него жидкости:

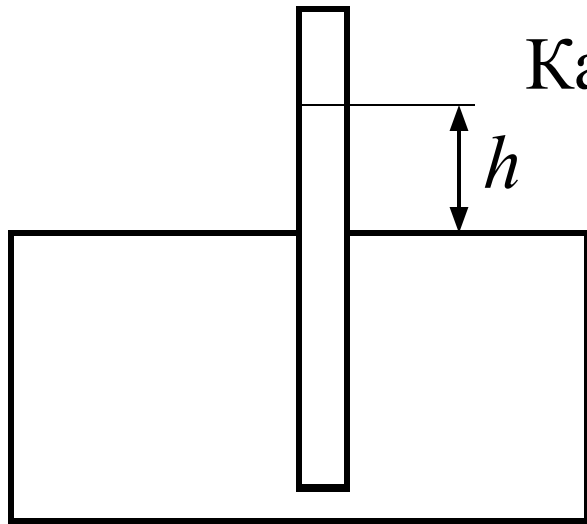


В момент отрыва капли:

$$mg = F_{\Pi} = \sigma l$$

Капельный метод определения σ

3. Поднятие жидкости в капиллярной трубке:



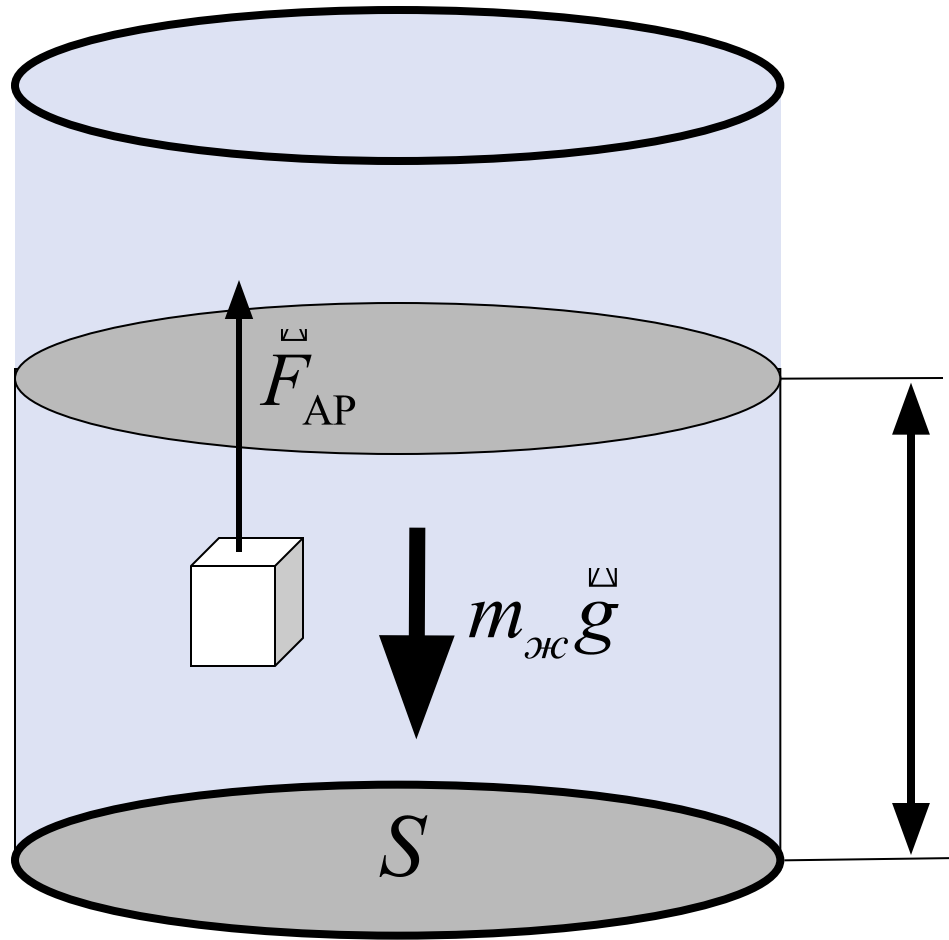
Капилляр с каналом радиуса r

Жидкость плотностью ρ ,
абсолютно смачивающая
поверхность капилляра

Высота поднятия жидкости:

$$mg = F_{\Pi} \quad \rightarrow \quad h = \frac{\sigma}{\rho g r}$$

Гидростатическое давление столба жидкости:



$$p = \frac{F_{\partial}}{S}$$

$$p_{ГС} = \frac{m_{жс} g}{S} = \frac{\rho_{жс} V g}{S} = \rho_{жс} g h$$

Следствие:

на тело, погруженное
в жидкость (газ)
действует суммарная
сила гидростатического
давления (сила Архимеда):

$$F_{AP} = \rho_{жс} V_{погр} g$$

Закон Паскаля

Давление, производимое на поверхность жидкости (газа), передается во все точки жидкости (газа) без изменения

Абсолютное давление (следствие) складывается из «внутренних» давлений, обусловленных свойствами системы (внутренние причины) и внешнего атмосферного давления (внешняя причина)

$$P_{абс.} = P_0 + \sum P_{вн.}$$

Нормальное атмосферное давление:

$$P_0 = 10^5 \text{ Па} \approx 760 \text{ мм рт.ст.}$$

Суммарное «внутреннее» давление —
избыточное над атмосферным.

Измеряется манометром.

$$p_{изб.} = \sum p_{вн.}$$

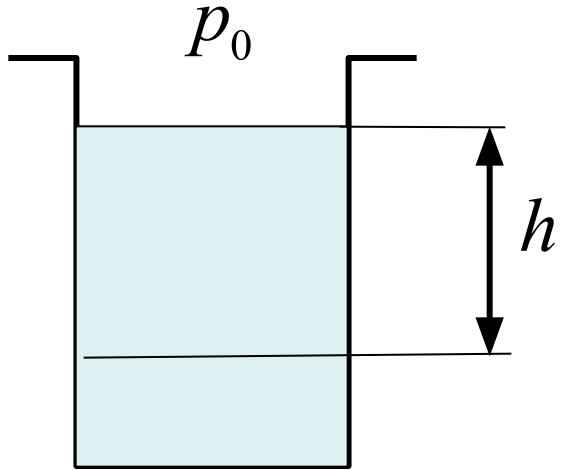
Атмосферное давление измеряется барометром

Абсолютное давление:

$$p_{абс.} = p_0 + p_{изб.}$$

Пример:

абсолютное давление
на глубине h в водоеме



«Внутреннее» гидростатическое
давление: $p_{\text{вн.}} = p_{\text{ГС}} = \rho gh$

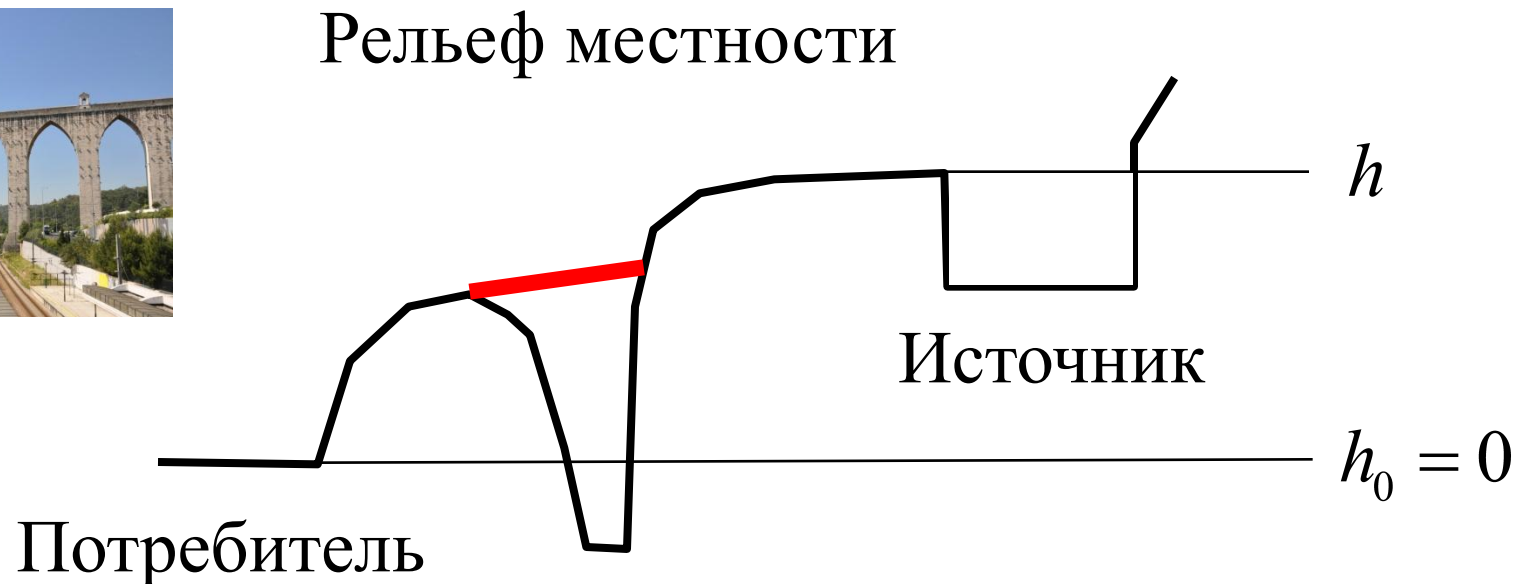
«Внешнее» атмосферное
давление: p_0

Абсолютное давление
(основное уравнение
гидростатики):

$$p_{\text{абс.}} = p_0 + \rho gh$$

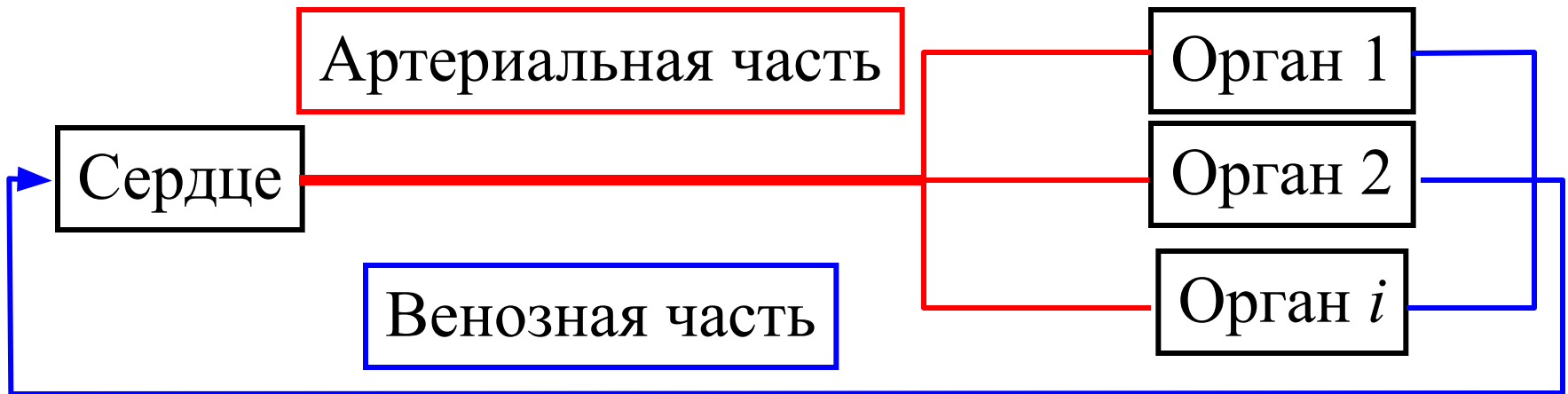
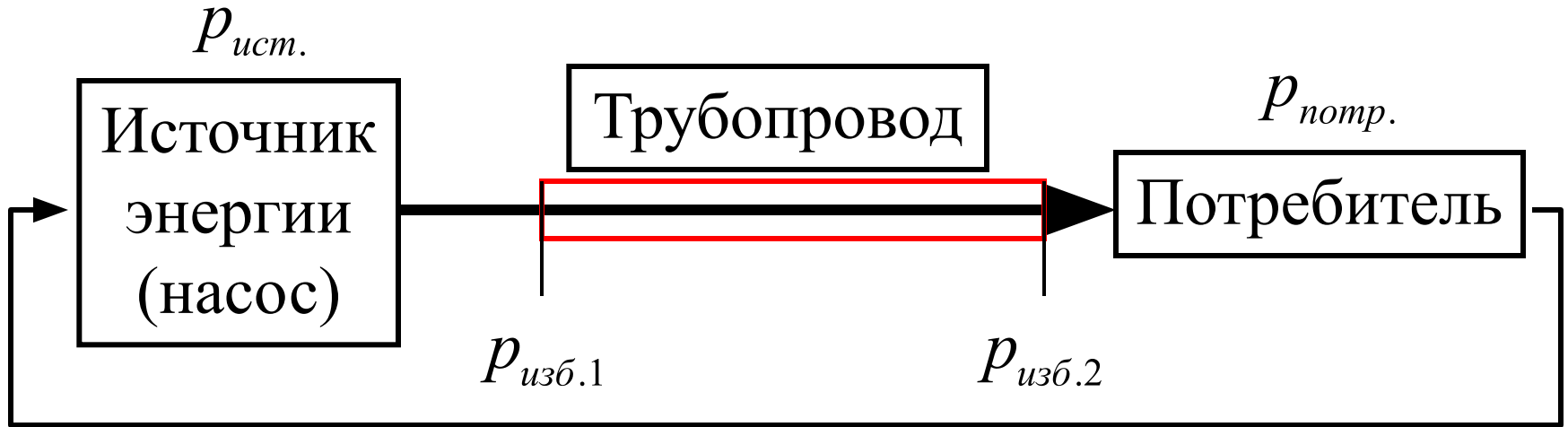
Гидродинамика рассматривает причины и следствия течения жидкости

Для течения (движения) жидкости (следствия)
необходим источник энергии (причина)

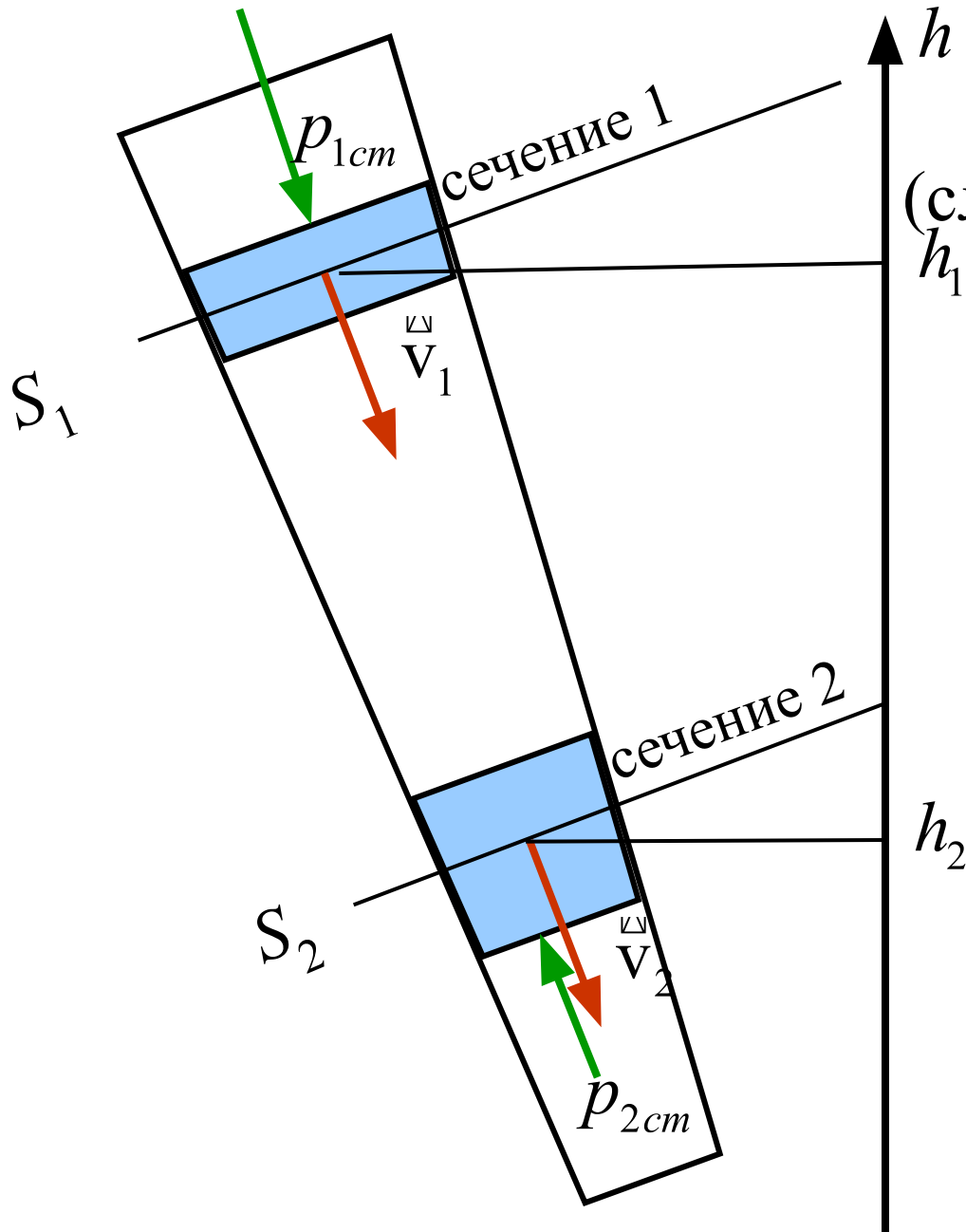


Источник: потенциальная энергия источника
относительно потребителя –
гидростатический напор ρgh

Общая гидродинамическая схема



Участок трубы с идеальной жидкостью



Уравнение
неразрывности струи
(следствие несжимаемости):

$$Q_V = Sv = const$$

$$Q_m = \rho Sv = const$$

S — площадь сечения

v — скорость жидкости
в данном сечении

h — высота сечения
относительно
условного «0»

Составляющие абсолютного давления:

$$p_{абс.} = p_0 + p_{изб.}$$

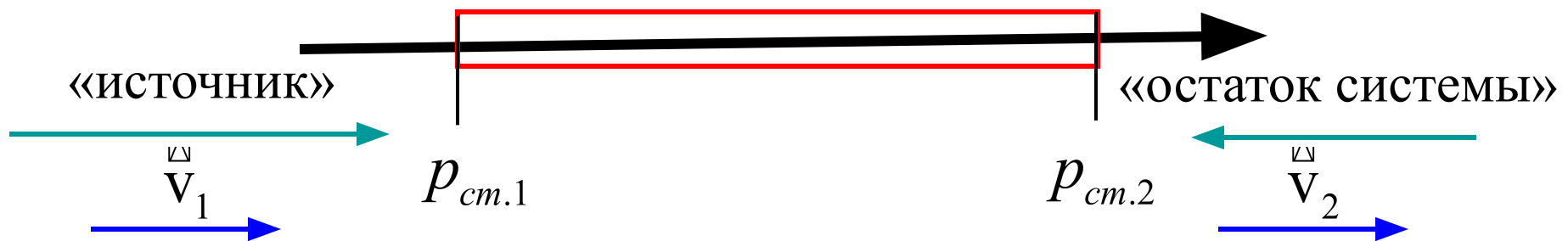
Атмосферное давление:

$$p_{01} = p_{02} = p_0$$

Составляющие избыточного давления:

1. $p_{ст.}$ – статическое давление на выделенное сечение «снаружи», связанное с работой по перемещению объема жидкости против сил давления

Трубопровод



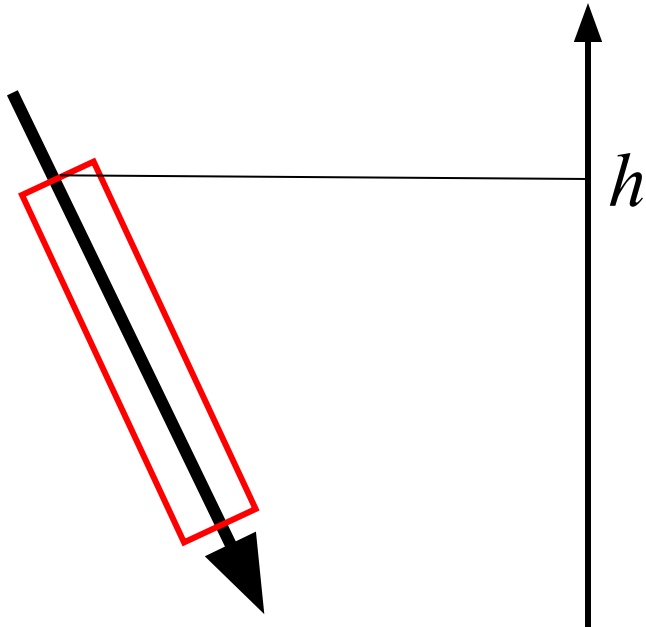
$p_{ст.1}$ — статическое давление со стороны «источника»

$p_{ст.2}$ — статическое давление со стороны
«остальной» части системы (противодавление)

2. $p_{дин.}$ — динамическое давление связанное с движением
(кинетической энергией движения) жидкости:

$$p_{дин.} = \frac{\rho v^2}{2} \quad \left(K = \frac{mv^2}{2} \right)$$

3. $p_{ГС}$ – гидростатическое давление, связанное с положением сечения относительно условного «0» (потенциальной энергией положения):

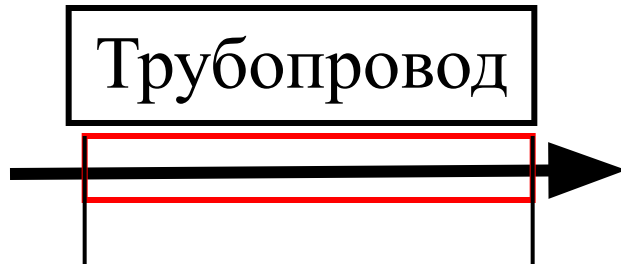


$$p_{ГС} = \rho gh$$

$$(\Pi = mgh)$$

Суммарное *избыточное* давление в данном сечении:

$$p_{изб\overline{ГС}} = p_{ст.} + p_{дин.}$$

 $p_{изб.1}$ $p_{изб.2}$

Жидкость идеальная →
→ нет потерь давления:

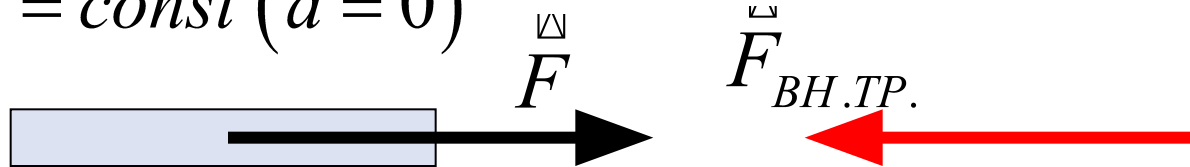
$$p_{изб.1} = p_{изб.2} = const$$

Уравнение Бернулли (закон сохранения энергии):

$$p_{cm.1} + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_{cm.2} + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 = const$$

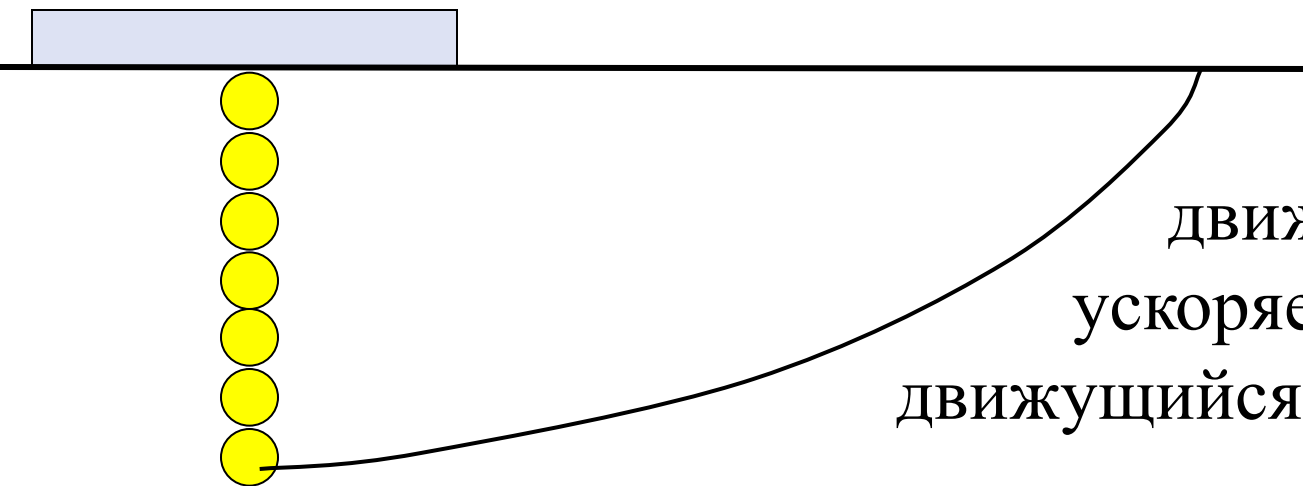
Реальная жидкость - модель природной жидкости, характеризующаяся изотропностью всех физических свойств, но в отличие от идеальной модели, обладает *внутренним трением* при движении

$$v = \text{const} \ (a = 0)$$



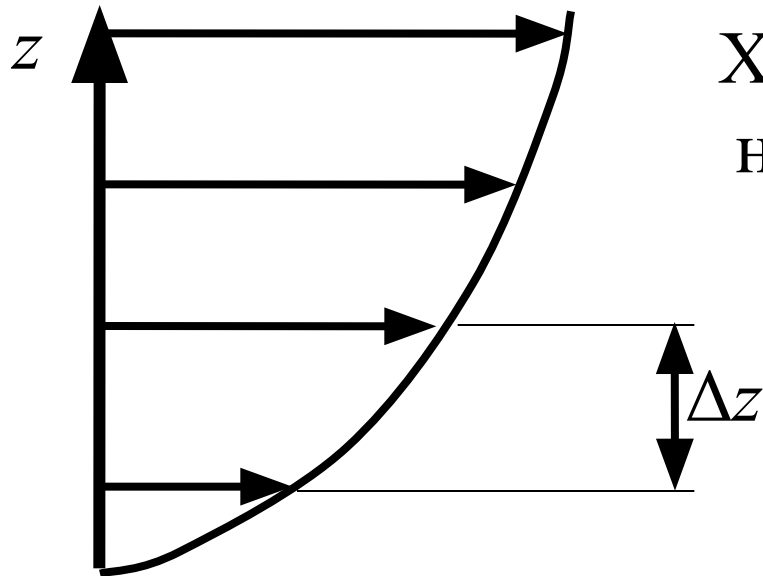
Поверхность жидкости

$$a = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$$



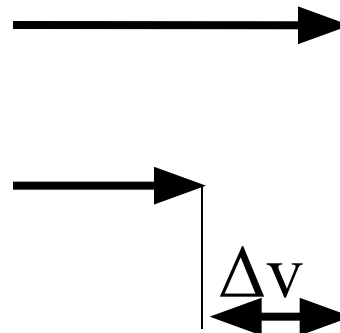
Слой жидкости, движущийся быстрее, ускоряет более медленно движущийся слой, и наоборот.

Взаимодействие слоев жидкости, движущихся с различными скоростями определяет внутреннее трение



Характеристика неравномерности направленного движения слоев —

градиент скорости:



$$\left| \frac{\Delta v}{\Delta z} \right| \rightarrow \left| \frac{dv}{dz} \right|$$

:Закон Ньютона для вязкого трения

$$F_{BH.TP.} = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S$$

$[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$ — коэффициент динамической вязкости

Численно равен силе внутреннего трения,
приходящейся на *единичную* поверхность
соприкосновения слоев при *единичном* градиенте
скорости

Коэффициент кинематической вязкости:

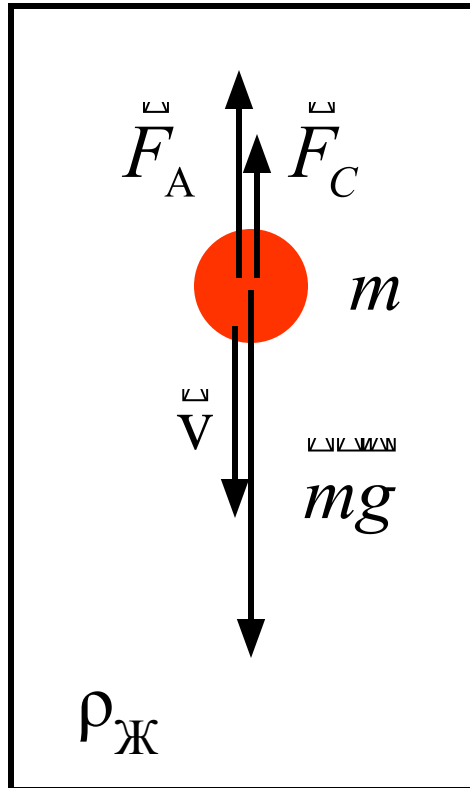
$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\nu] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Ньютоновские жидкости:

$$\eta \neq f\left(\frac{dv}{dz}\right)$$

Неньютоновские жидкости:

$$\eta = f\left(\frac{dv}{dz}\right)$$



Сила Стокса

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

$\vec{F}_C \uparrow \downarrow \vec{v}$ – сила Стокса

Для шарика радиуса r :

$$F_C = 6\pi \eta v$$

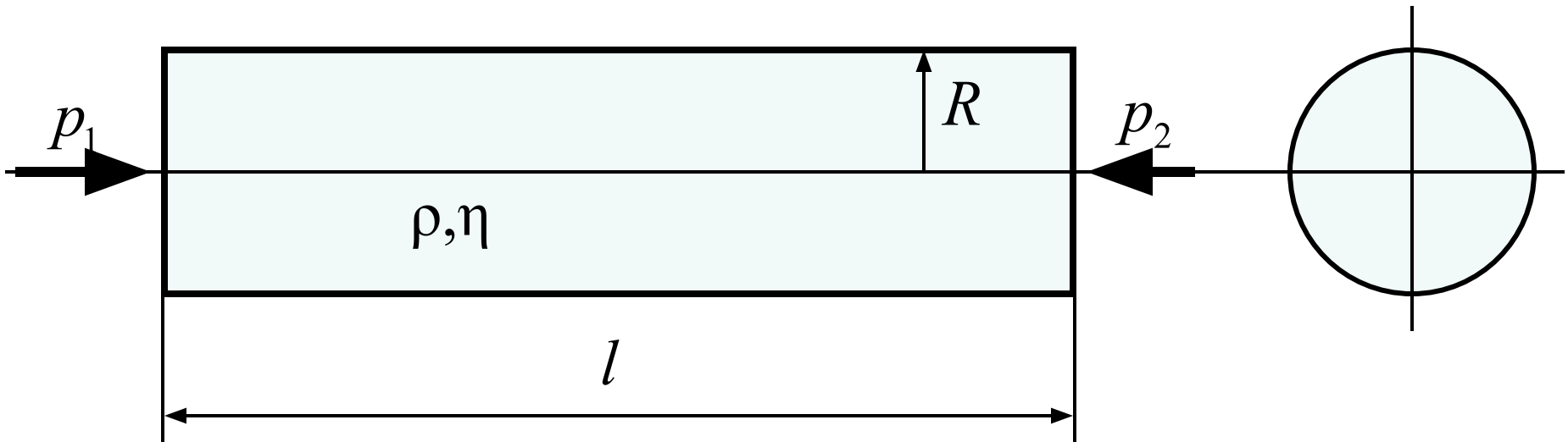
$$\sum \vec{F}_i = \vec{mg} + \vec{F}_A + \vec{F}_C = 0$$

Течение ньютоновской вязкой жидкости по круглой гладкой трубе с жесткими стенками

Заданы: длина трубы l ; радиус трубы R ;

свойства жидкости: плотность ρ и вязкость η ;

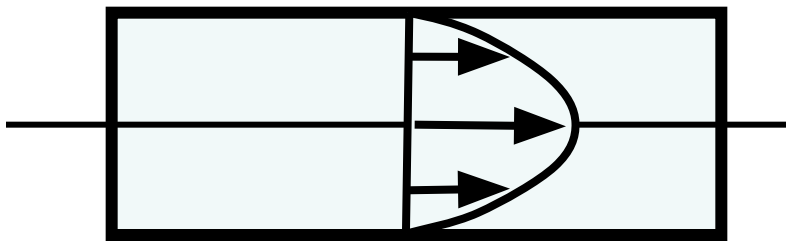
перепад давлений на торцах трубы: $p_1 - p_2$



Задачи:

1. Описать распределение скоростей частиц жидкости по сечению трубы: найти зависимость скорости частиц жидкости от радиальной координаты (расстояния от частицы до оси трубы)

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



Вывод: скорость максимальна на оси трубы, у стенок скорость равна нулю («прилипание»)

2. Определить расход жидкости через трубу

Уравнение Пуазейля:

Следствие

Причина

$$Q_m = \pi \rho \frac{p_1 - p_2}{8 \eta l} R^4$$

Общее свойство
жидкости и трубы

$$Q_m = \frac{p_1 - p_2}{R_\Gamma} \quad \left(I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_m \rightarrow I \\ p_1 - p_2 \rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 \end{array} \right\} R_\Gamma = \frac{8 \eta l}{\pi \rho R^4}$$

R_Γ – гидравлическое сопротивление трубы



$$Q_{m1} = \rho_1 v_1 S_1 = Q_{m2} = \rho_2 v_2 S_2$$

$p_{изб.1}$ – давление в сечении 1; $p_{изб.2}$ – давление в сечении 2

Идеальная жидкость:

$$p_{изб.1} = p_{изб.2} = const$$

$$p_{ст.1} + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 =$$

$$= p_{ст.2} + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2$$

Вязкая жидкость:

$$p_{изб.1} \neq p_{изб.2}$$

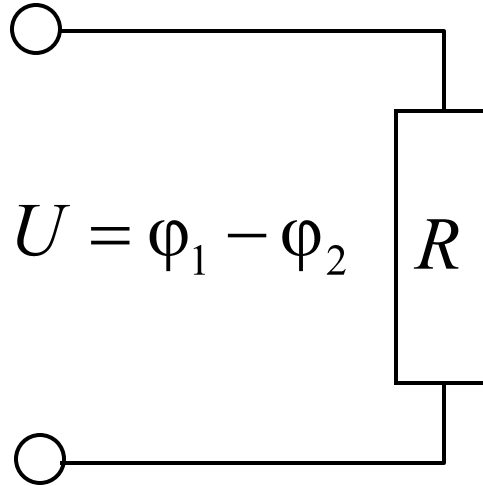
Потеря давления на
вязкое трение:

$$\Delta p_{изб.} = p_{изб.1} - p_{изб.2} = Q_m R_\Gamma$$

Аналогия с передачей электроэнергии ЭЭ

Источник напряжения

φ_1 ЛЭП $r = 0$



$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

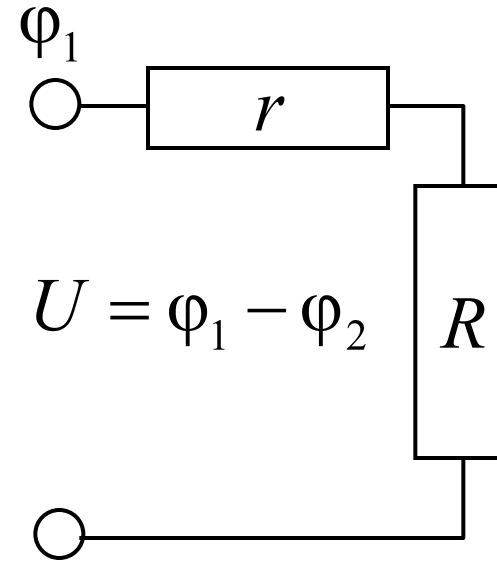
$$\varphi_2 \quad U_{\text{ПР}} = U$$

$$\Delta U_{\text{ЛЭП}} = 0$$

$$I = \frac{U}{R}$$

Приемник ЭЭ резистор R

ЛЭП $r \neq 0$



$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$\varphi_2 \quad I = \frac{U}{R + r}$$

$$U_{\text{ПР}} \neq U$$

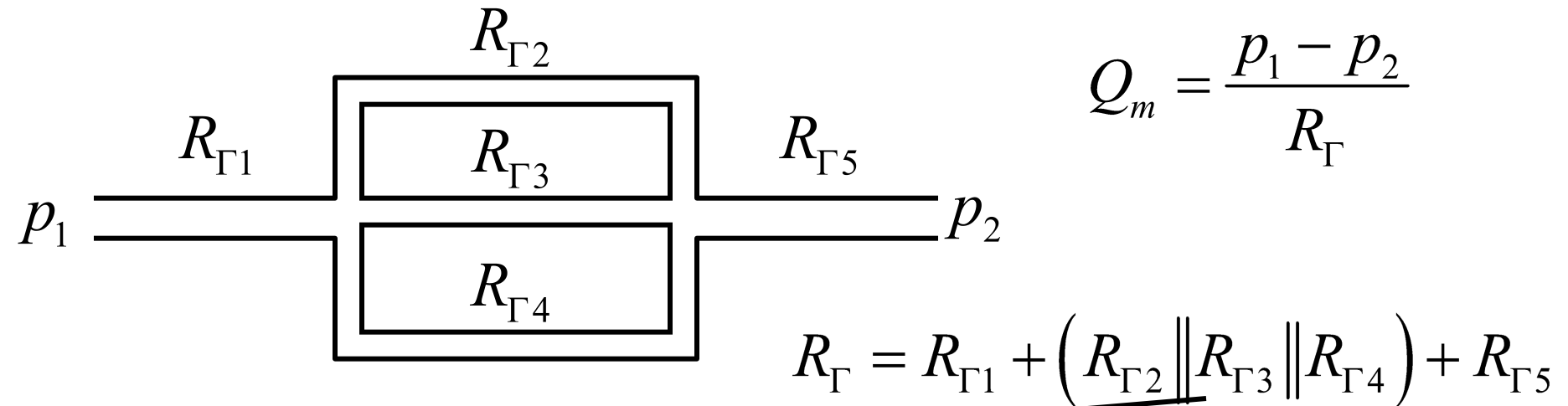
Потеря напряжения:

$$\Delta U_{\text{ЛЭП}} = Ir \neq 0$$

Для произвольных труб (сосудов):

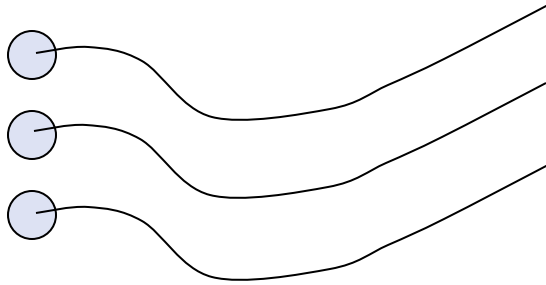
$$R_{\Gamma} = \frac{8\eta l}{\pi \rho R^4} \quad - \text{выполняется качественно:}$$

$$\begin{array}{ll} \eta \uparrow \rightarrow R_{\Gamma} \uparrow & \rho \uparrow \rightarrow R_{\Gamma} \downarrow \\ l \uparrow \rightarrow R_{\Gamma} \uparrow & R \uparrow \rightarrow R_{\Gamma} \downarrow \end{array}$$



$$\frac{1}{R_{\Gamma 2,3,4}} = \frac{1}{R_{\Gamma 2}} + \frac{1}{R_{\Gamma 3}} + \frac{1}{R_{\Gamma 4}}$$

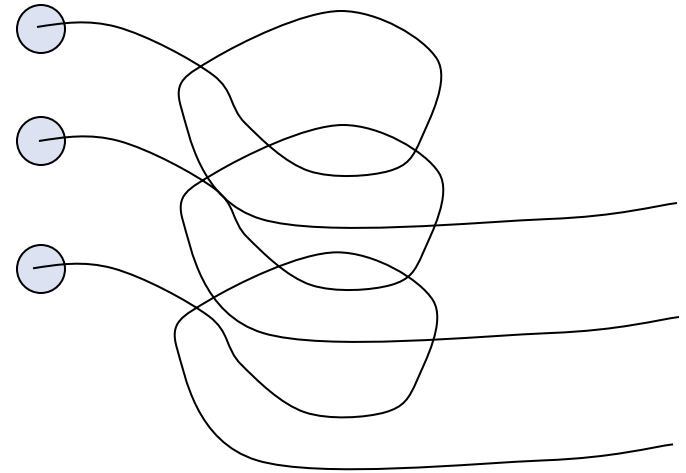
Ламинарное течение (слоевое)



Траектории отдельных
частиц не пересекаются

$$Re \leq Re_{кр}$$

Турбулентное течение (вихревое)



Траектории вихревые,
пересекают друг друга

$$Re \gg Re_{кр}$$

Характер течения определяется значением критерия
Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{v d}{\nu}$$

$$[Re] = [-]$$

$$Re_{\text{критическое}}^{\text{круглые}} = 2300$$

$$Re_{\text{крови}}^{\text{критическое}} = 970 \pm 80$$

Общие выводы:

1. «Движущей силой» течения любой жидкости является перепад давления
2. Для любых жидкостей справедливо уравнение неразрывности

3. Уравнение Бернулли для реальных жидкостей имеет качественный (неколичественный) характер:

$$\rho gh_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 \neq \rho gh_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + p_1$$

Причина – потери давления на вязкое трение и на «геометрию» канала течения

4. Уравнение Пуазейля для реальных жидкостей имеет качественный (неколичественный) характер:

$$R_{\Gamma B} = f(\eta, v, l, R) \quad Q = \frac{p_1 - p_2}{R_{\Gamma}}$$