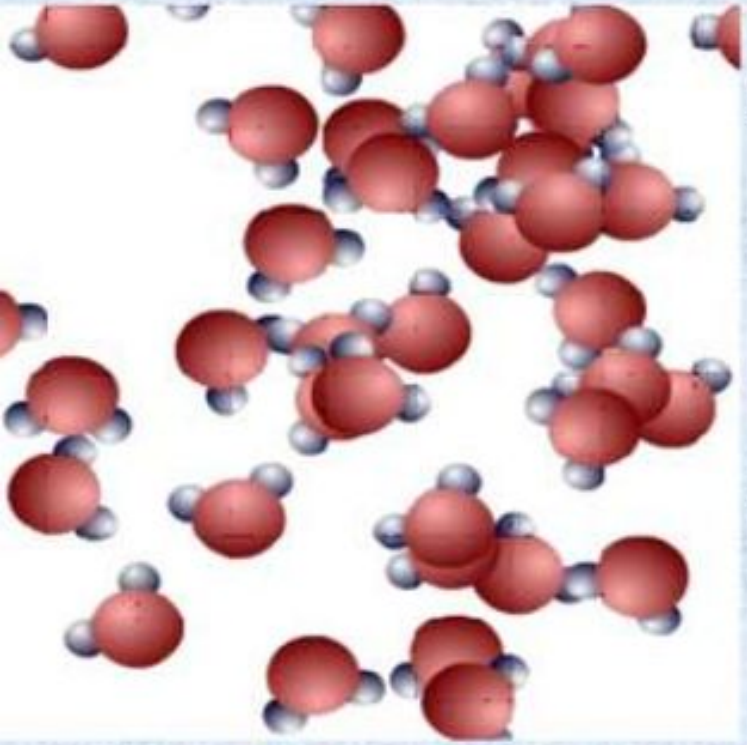
Лекция 3

Механика и свойства жидкостей

Содержание:

1) **Условие неразрывности струи**
2) **Вязкость жидкостью Закон Ньютона**
3) **Течение вязкой жидкости по трубе**
4) **Измерение вязкости**
5) **Ламинарное и турбулентное течение**
6) **Поверхностное натяжение**
7) **Смачивание и несмачивание**
8) **Капиллярные явления**

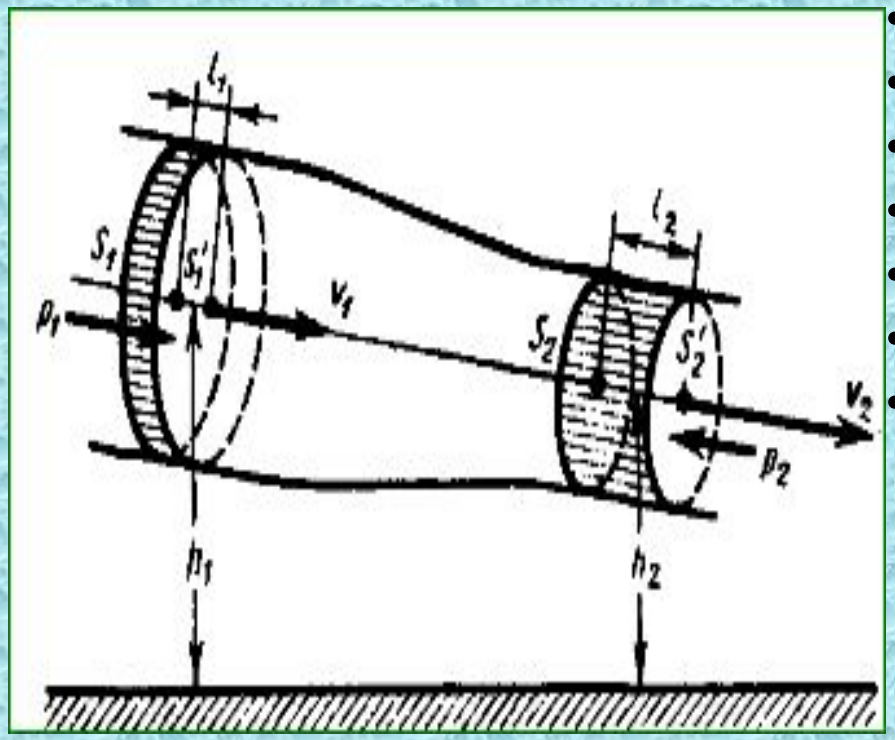
Особенности молекулярного строения жидкостей



1. Расстояние между частицами меньше размеров молекул.
2. Расположение и движение частиц - колеблются около положений равновесия, перескакивая из одного положения равновесия в другое.
3. Силы межмолекулярного взаимодействия - действуют силы притяжения и отталкивания.

Потенциальная энергия молекул больше их кинетической энергии: $E_п > E_к$

Условие неразрывности струи



- S_1, S_2 – площади сечений трубы
- h_1, h_2 – высота над уровнем земли
- ν_1, ν_2 – скорости жидкости
- в сечениях S_1 и S_2
- l_1, l_2 – пути, проходимые
- жидкостью за одно и то же время
- $\Delta h = h_1 - h_2$ – перепад высот

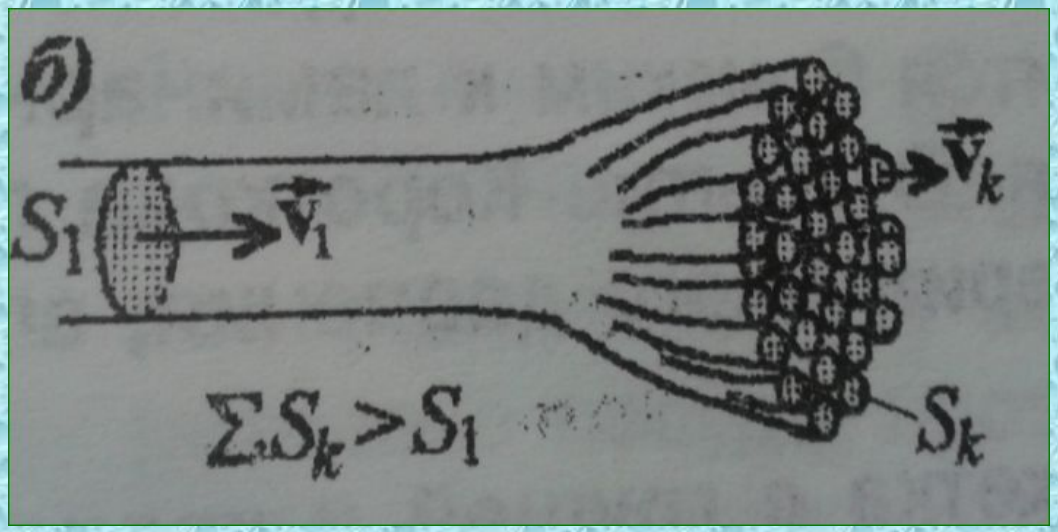
При стационарном течении объемы жидкости, протекающие в каждом сечении трубы за одно и то же время одинаковы!

$V_1 = V_2$

$V = Sl = Stv$ $\quad S_1 t v_1 = S_2 t v_2$ $\quad S_1 v_1 = S_2 v_2$ $\quad Sv = const$

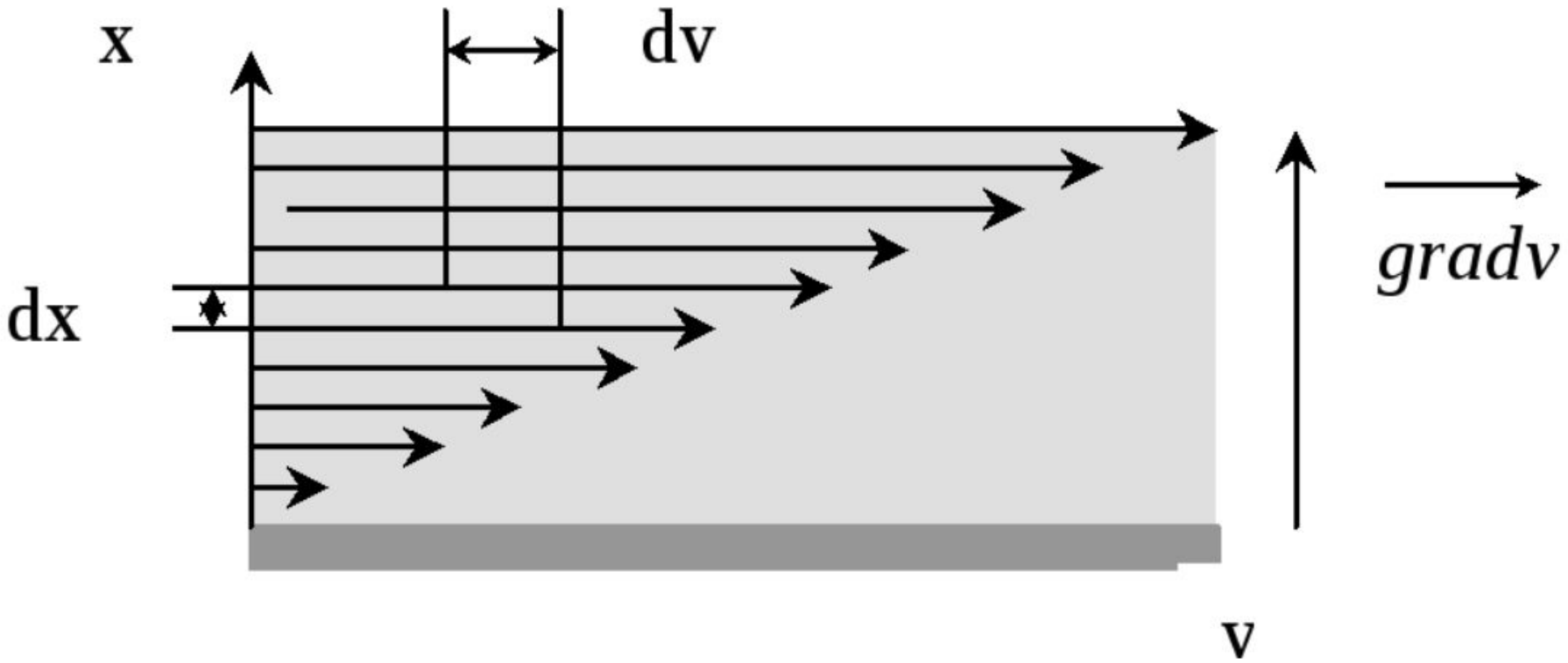
$$v_1 / v_2 = S_2 / S_1$$

Сосуды	Диаметр, мм	Скорость, 10^{-2} м/с	Давление, мм рт.ст.
Аорта	20	30–50	50–150
Артерии	10–5	20–50	80–20
Артериолы	0,1–0,5	1–20	50–20
Капилляры	0,5–0,01	0,01–0,05	20–10
Венулы	0,1–0,2	0,1–1,0	10–5
Вены	10–30	10–20	(–5)–(+5)



Разветвление крупного сосуда на множество капилляров равносильно увеличению площади его сечения, т.к. суммарная площадь сечения капилляров больше площади сечения до разветвления

Вязкость жидкости



Способность реальных жидкостей оказывать сопротивление движению в них тел или собственному течению за счет сил межмолекулярного взаимодействия называется **внутренним трением или вязкостью**

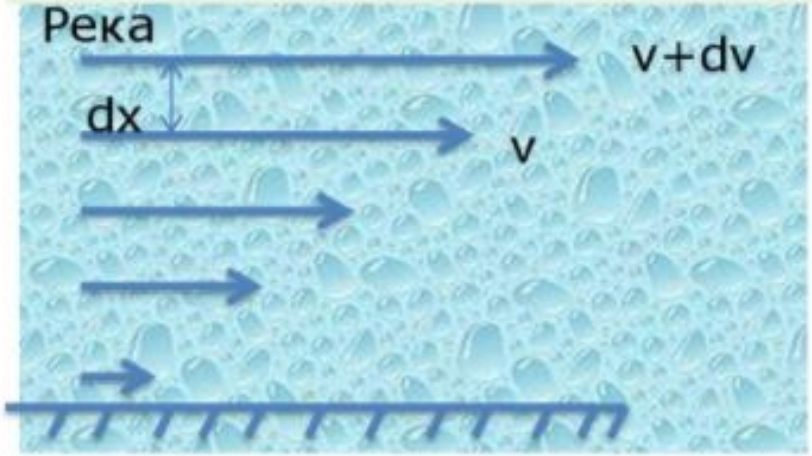
Профиль скоростей течения жидкости

$$F = \eta \frac{d\upsilon}{dx} \cdot S$$

-уравнение Ньютона

Формулировка: сила внутреннего трения F между слоями движущейся жидкости прямо пропорциональна скорости сдвига $\frac{d\upsilon}{dx}$, площади поверхности соприкасающихся слоев S. Коэффициентом пропорциональности является коэффициент **вязкости η**.

$$[\eta] = \text{Па} * \text{с}, \text{Пуаз}$$



Между слоями существует **градиент скорости = скорость сдвига:**

$$\frac{d\upsilon}{dx} = grad\upsilon$$

➡ **Вязкость (η) зависит от состояния и молекулярных свойств жидкости (температуры, плотности среды)**

жидкость	η (мПа.с)
вода (0 °C)	1.8
вода (20 °C)	**1.0**
вода (100 °C)	0.3
кровь, норма (37 °C)	~4
плазма крови, норма (37 °)	~1.5
воздух	0.018
кровь, диабет (37 °C)	~ 23
кровь, туберкулез (37 °C)	~ 1.0

➡ **η Сильно зависит от температуры**

➡ **η уменьшается с увеличением температуры среды**

Вязкость зависит от

температуры

t ↑ η ↓ Для жидкостей

Природы жидкости

Формы молекул

Кинематическая вязкость

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

$$\nu = \frac{м^2}{с}$$

[Ст] = стокс

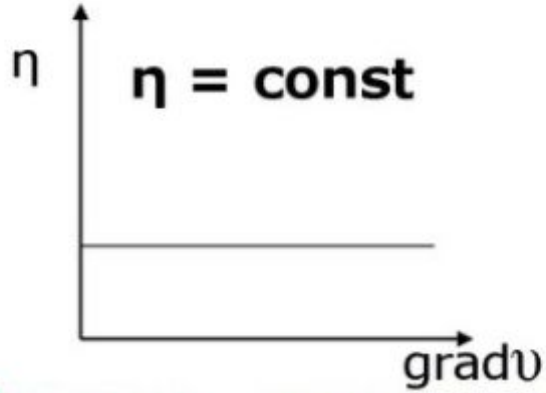
Текучесть - величина, **обратная** вязкости

Ньютоновские и неньютоновские жидкости

$$\sigma = \eta \bullet \text{grad } v$$

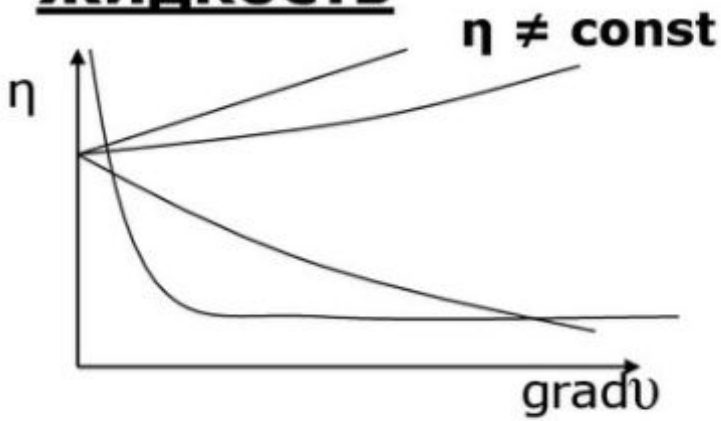
η *не зависит* от gradυ **η *зависит* от gradυ**

Ньютоновская жидкость



Пример*: *однородная жидкость, вода, ртуть, глицерин, лимфа, **плазма** крови, **сыворотка**

Неньютоновская жидкость



Пример*: *неоднородные жидкости, суспензии, **кровь**, эмульсии, замазка, крем.

Кровь как неньютоновская жидкость

Кровь = плазма + форменные элементы

Кровь является **неньютоновской** жидкостью, так как это **суспензия** форменных элементов в белковом растворе. Вязкость η крови **4÷5 мПа•с**

ВОПРОС: Каких форменных элементов?

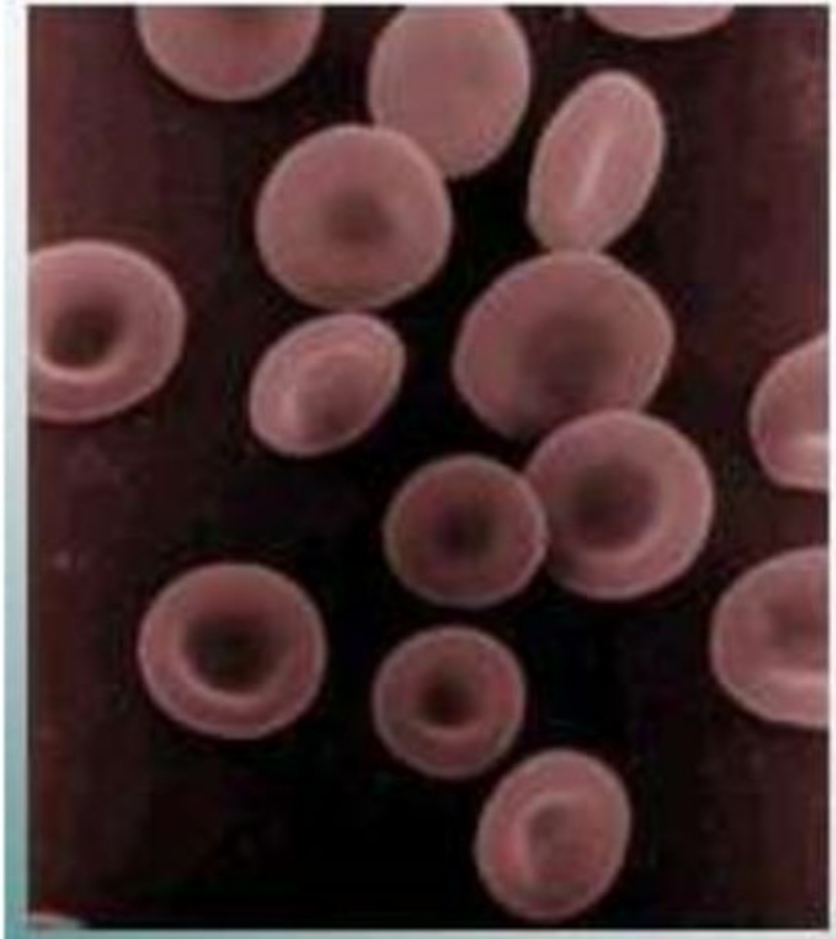
Эритроцитов.

ПОЧЕМУ эритроцитов?

Эритроциты составляют 93%

Кровь – неньютоновская жидкость

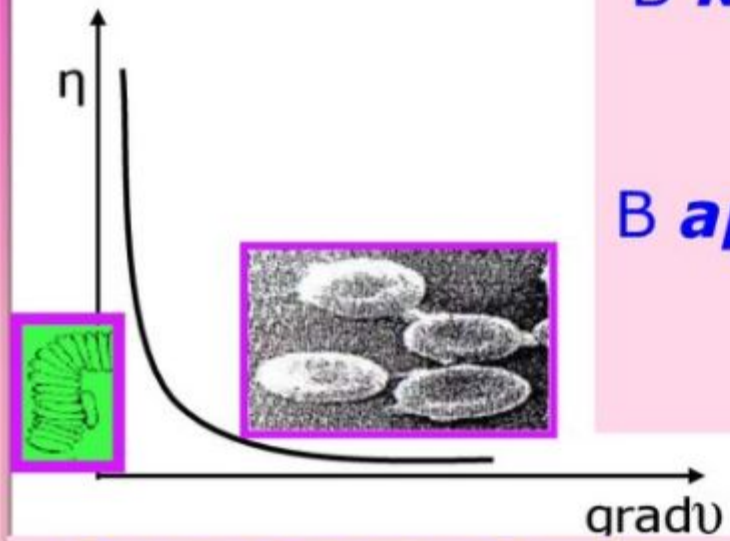
Высокая скорость течения



Низкая скорость течения

Монетные столбики

Вязкость крови зависит от режима течения.
Чем медленнее течет кровь, тем выше вязкость



Зависимость вязкости крови от режима течения

В ***капиллярах*** grad v ↓ ⟹ η ↑

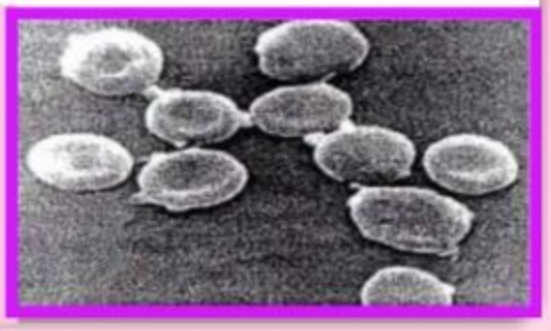
η = **800 мПа•с**

В ***артериях*** grad v ↑ ⟹ η ↓

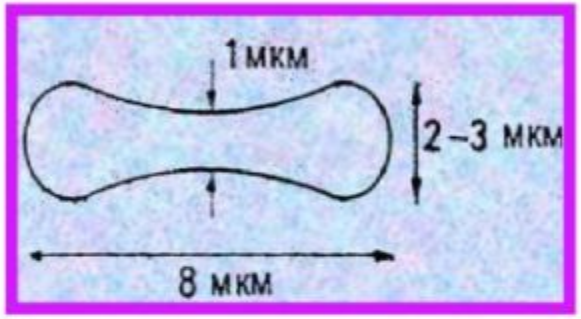
η = **4-5 мПа•с**

При **низких** скоростях сдвига эритроциты образуют **«монетные столбики»**

При **высоких** скоростях сдвига вязкость крови определяется
1) ***Концентрацией*** эритроцитов
2) Их ***физическими свойствами***.



Влияние физических свойств эритроцитов на вязкость крови



1. **Форма** клеток
2. **Эластичность** оболочки
3. Способность к **деформации**
4. Наличие **двойного** электрического слоя.

Эритроциты заряжены **отрицательно**.

5. Способность образовывать **агрегаты** при низких скоростях сдвига.

6. **Адгезность**

Плазма крови – водно-солевой белковый раствор.

Плазма – **ньютоновская** жидкость.

η=1,2мПа•с

Вопрос:

Эта цифра вязкости при **37^{0}С**. Что с ней произойдет при повышении температуры до 41^{0}С ?

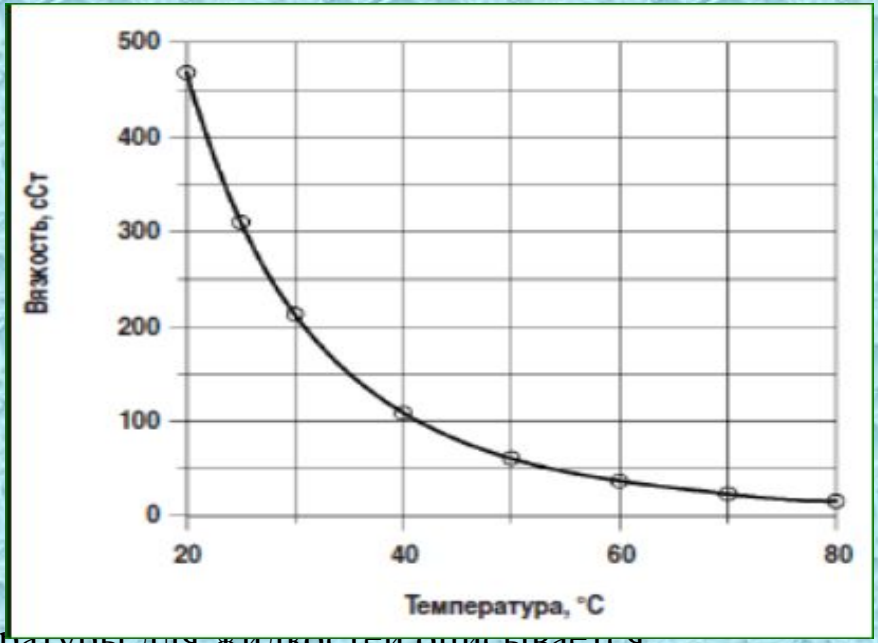
Понизится на 10%

Сыворотка – это плазма без фибриногена

η=1,1мПа•с

Зависимость вязкости жидкости от температуры

Температура воды, °С	Поверхностное натяжение, дин/см	Вязкость МПа С
0	75,6	1,8
18	73	1,0
37	70	0,7
45	69	0,6
70	64,5	0,4



Зависимость коэффициента вязкости от температуры для жидкостей описывается следующим уравнением:

$$\eta = Ae^{W/kT}$$

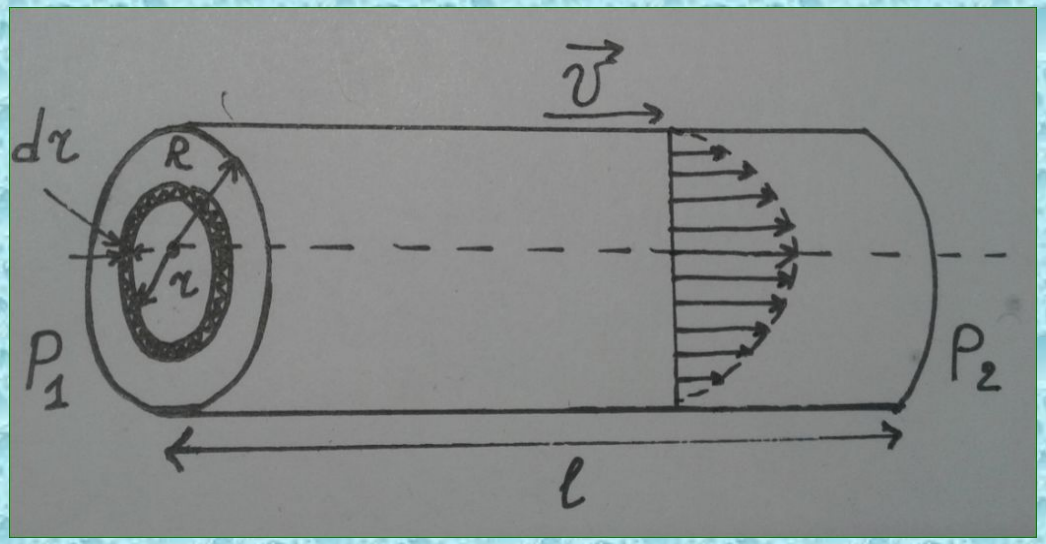
Где η - коэффициент вязкости, W – энергия активации, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана, A – коэффициент, который зависит от температуры.

Вязкости некоторых жидкостей

Температура воды, °С	Поверхностное натяжение, дин/см	Вязкость МПа С
0	75,6	1,8
18	73	1,0
37	70	0,7
45	69	0,6
70	64,5	0,4

Жидкость	t, °С	μ, П	ν, Ст
Бензин	15	0,0065	0,0093
Глицерин:			
50%-ный водный раствор	20	0,0603	0,0598
86%-ный водный раствор	20	1,2970	1,0590
безводный	20	14,990	11,890
Керосин	15	0,0217	0,0270
Мазут	18	38,700	20,000
Молоко цельное	20	0,0183	0,0174
Нефть:			
легкая	18	0,178	0,250
тяжелая	18	1,284	1,400
Патока	18	888	600
Ртуть	15	0,0154	0,0011
Скипидар	16	0,0160	0,0183
Спирт этиловый	20	0,0119	0,0154
Эфир	20	0,0246	0,00327

Течение вязкой жидкости по трубе



$P_1 \rangle P_2$ $\Delta P = P_1 - P_2$
жидкость течет за счет разности давлений
R- радиус трубы
l – длина трубы

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

- Распределение скорости жидкости по трубе круглого сечения

$$V = \frac{\pi r^4 t \Delta p}{8l\eta}$$

- Объем жидкости, протекающий по трубе за время t

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8l\eta}$$

$\frac{1}{X}$

- Формула Пуазейля

X – гидравлическое сопротивление

Методы определения вязкости жидкости.

- Совокупность методов измерения вязкости называют ***вискозиметрией***, и приборы, используемые для таких целей - ***вискозиметрами***.
- **Капиллярные методы** основаны на законе Пуазейля и заключаются в измерении времени протекания через капилляр жидкости известной массы под действием силы тяжести при определенном перепаде давлений.

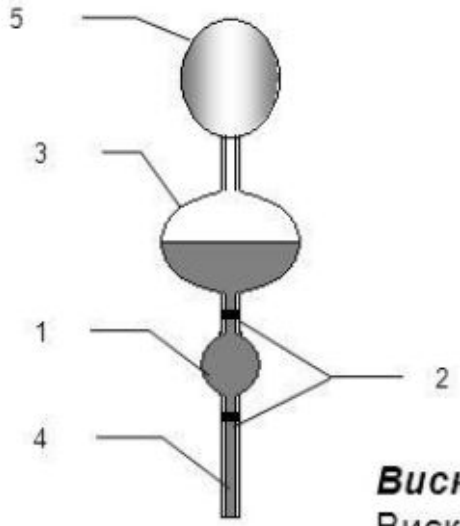


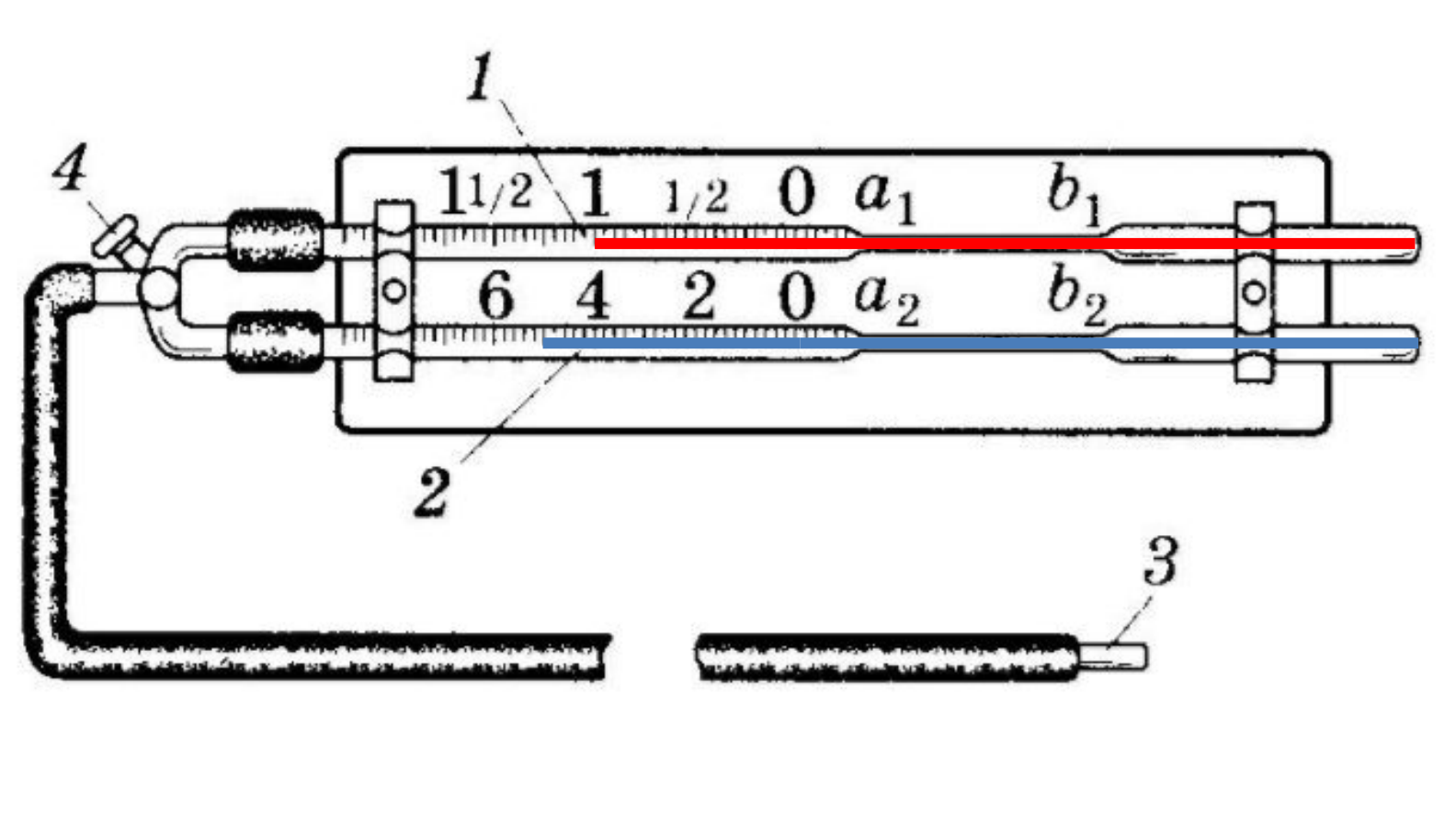
Рис. 7. Вискозиметр Оствальда.
1 – измерительный резервуар,
2 – кольцевые метки,
3 – резервуар,
4 – капилляр,
5 – груша.

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 l \eta}$$

Вискозиметр Оствальда.
Вискозиметр Оствальда представлен на рисунке 7.

MyShared

Медицинский Вискозиметр Гесса



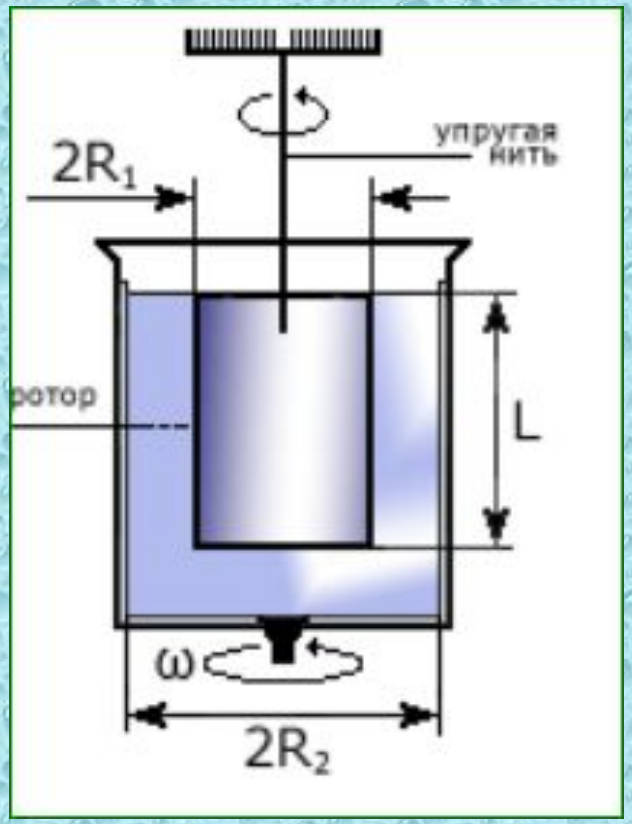
$$\frac{\pi r^4 \Delta p}{8 l_к \eta_к} = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 l_в \eta_в} \Rightarrow \eta_к = \frac{l_в}{l_к} \eta_в$$

1 сП = 1мПа ∗ с

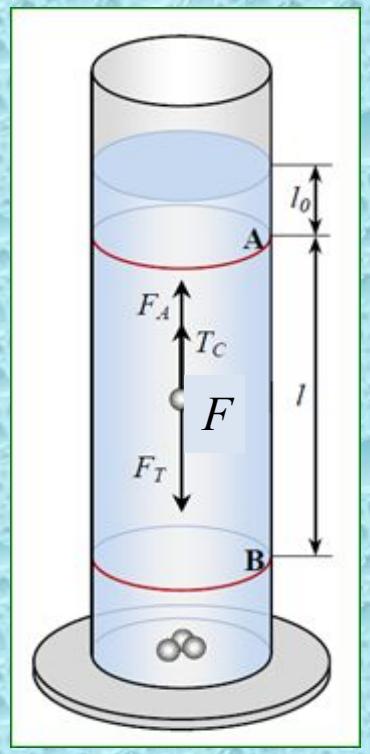
1

$$\Rightarrow \eta_к = l_в$$

Измерение вязкости.
Ротационный вискозиметр



Метод падающего шарика



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

где

- F — сила трения, так же называемая силой Стокса,
- r — радиус сферического объекта,
- η — динамическая вязкость жидкости,
- v — скорость частицы.

m – масса шарика
$V_т$ - объем шарика
ρ – плотность шарика
$\rho_ж$ - плотность жидкости
g – ускорение свободного падения

$$F_т = mg = V_т \rho g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$$

$$F_A = V_т \rho_ж g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_ж g$$

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

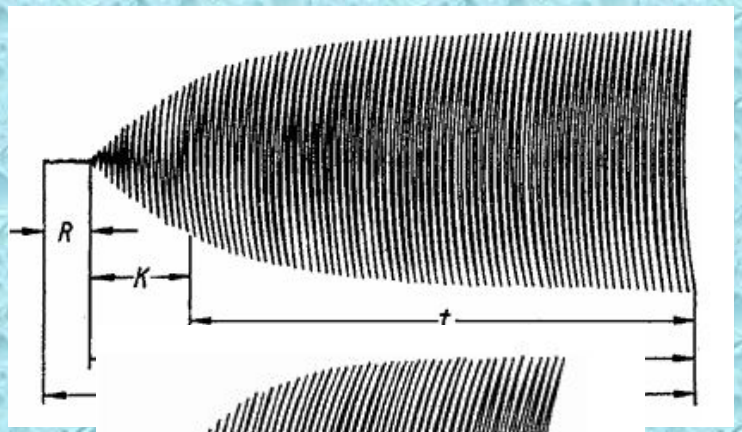
$$\frac{4\pi r^3 \rho g}{3} = \frac{4\pi r^3 \rho_ж g}{3} + 6\pi \eta r v$$

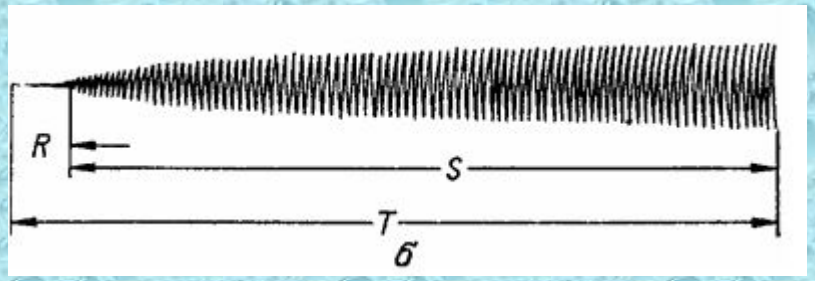
Отсюда определим искомую вязкость:

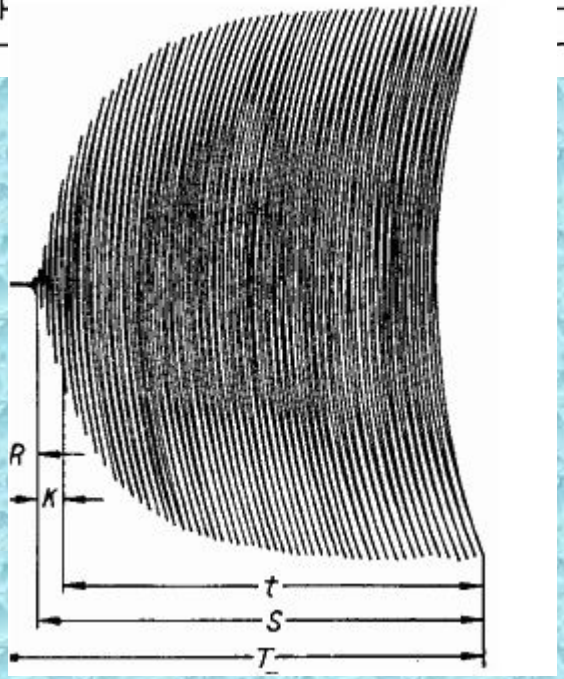
$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_ж) r^2 g}{9v}$$

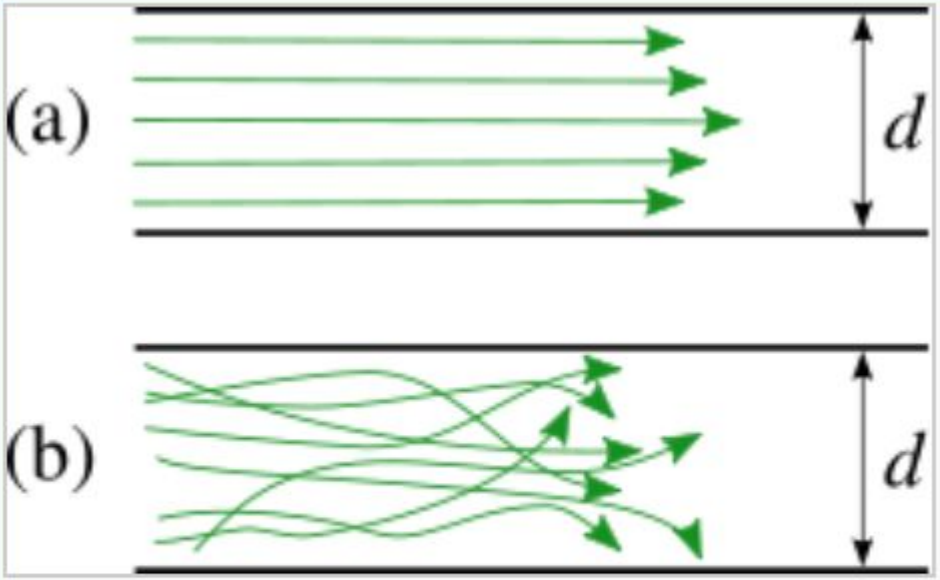
Вязкость крови

Тромбоэластография - графическая регистрация процесса свертывания крови, путем определения динамики ее вязкости. Запись тромбоэластограммы производится с помощью прибора тромбоэластографа при постоянной температуре (37°С).









Схематичное изображение ламинарного (a) и турбулентного (b) течения в плоском слое

Ламинарное течение — течение, при котором жидкость или газ перемещается слоями без перемешивания и пульсаций (то есть беспорядочных быстрых изменений скорости и давления).

Увеличение скорости течения вязкой жидкости вследствие неоднородности давления создает завихрения и движение становится вихревым, или **турбулентным.** При турбулентном течении скорость частиц в каждом месте беспорядочно и хаотически изменяется, движение является нестационарным

Характер течения жидкости по трубе зависит от свойств жидкости, скорости ее течения, размеров трубы и определяется *числом Рейнольдса:*

$$\mathrm{Re} = \rho_ж \upsilon D/\eta,$$

где $\rho_ж$ — плотность жидкости; η — ее вязкость; D — диаметр трубы; υ — скорость течения.

Если число Рейнольдса больше некоторого критического ($\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_{кр}$), то движение жидкости турбулентное. Например, для гладких цилиндрических труб $\mathrm{Re}_{кр} \approx 2300$.

Так как число Рейнольдса зависит от вязкости и плотности жидкости, удобно ввести их отношение, называемое ***кинематической вязкостью***:

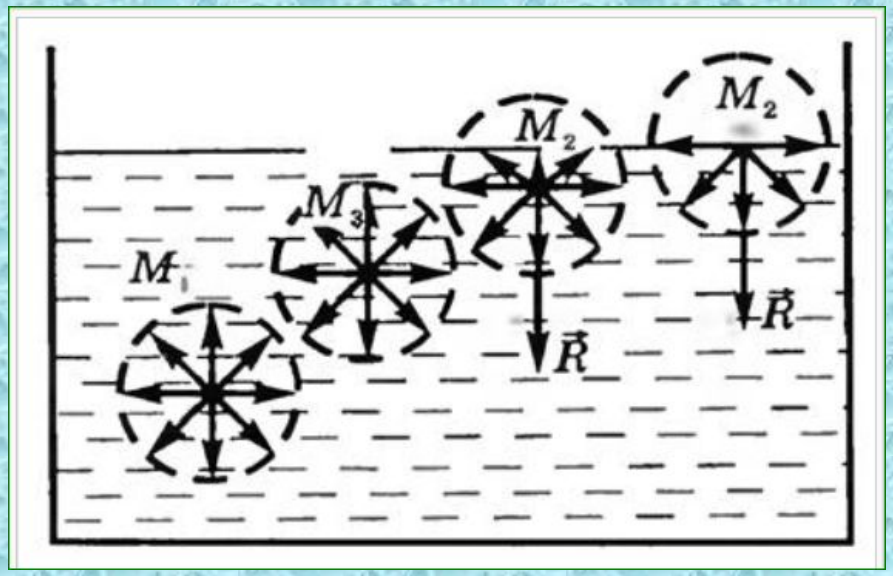
$$\nu = \eta / \rho_ж.$$

Используя это понятие, число Рейнольдса можно выразить в виде

$$\mathrm{Re} = \upsilon D/\nu. \qquad (9.17)$$

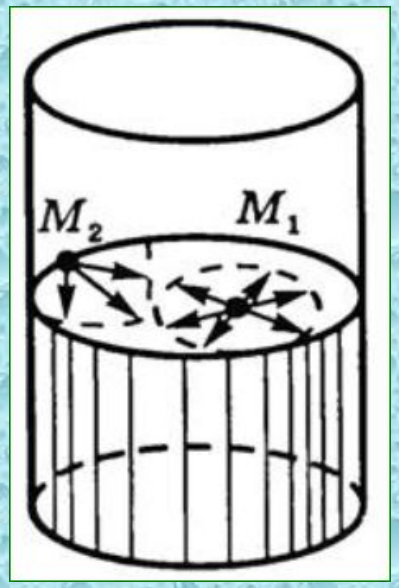
Единицей кинематической вязкости является *квадратный метр на секунду* ($м^2/с$), в системе СГС — *стокс* (Ст); соотношение между ними: 1 Ст = 10^{-4} $м^2/с$.

Поверхностное натяжение



$$\sigma = \frac{A}{\Delta S}.$$

Коэффициент поверхностного натяжения — величина, численно равная работе, совершенной молекулярными силами при изменении площади свободной поверхности жидкости на 1 м^2 при постоянной температуре .

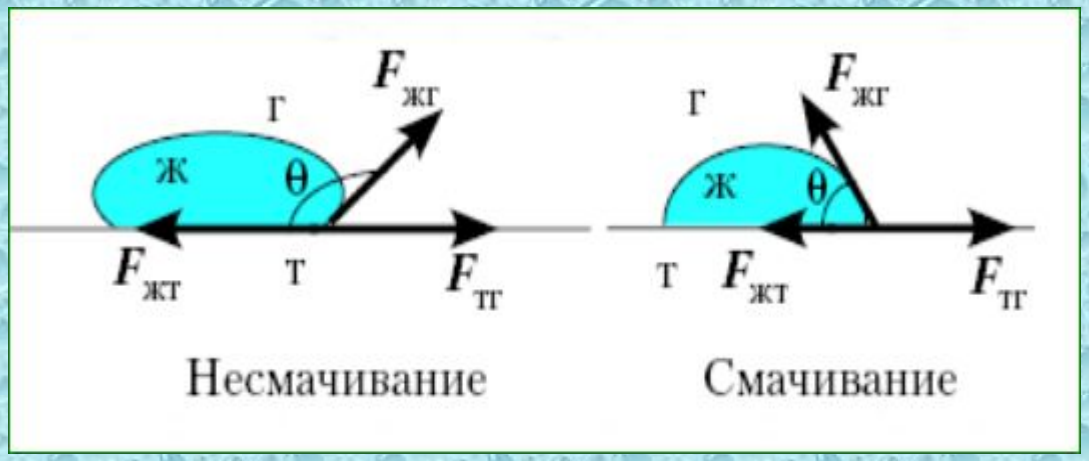


$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

Коэффициент поверхностного натяжения **σ** численно равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины границы свободной поверхности жидкости. Коэффициент поверхностного натяжения зависит от природы жидкости, от температуры и от наличия примесей. При увеличении температуры он уменьшается.

При критической температуре, когда исчезает различие между жидкостью и паром, σ = 0.

Смачивание и несмачивание

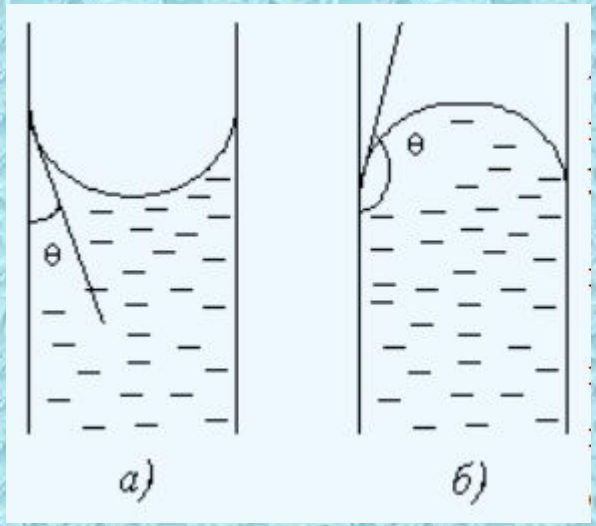


Смачивание — это поверхностное явление, заключающееся во взаимодействии жидкости с поверхностью твердого тела или другой жидкости.

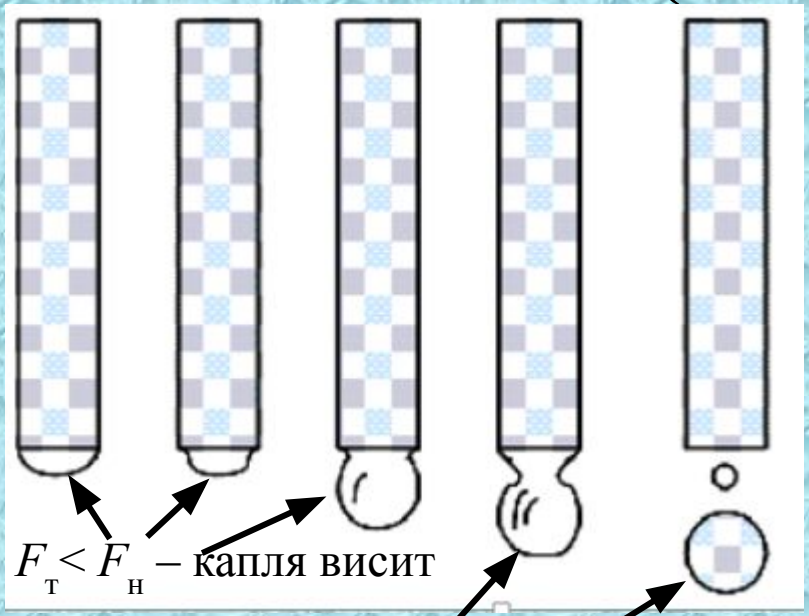
$$cos\theta = \frac{\sigma_{тж} - \sigma_{тг}}{\sigma_{гж}}$$

Отмеченный на рисунке угол θ называют краевым углом. Краевой угол образуется плоской поверхностью твердого тела и плоскостью, касательной к свободной поверхности жидкости, где граничат твердое тело, жидкость и газ; внутри краевого угла всегда находится жидкость. Для смачивающих жидкостей краевой угол острый, а для не смачивающих — тупой. Чтобы действие силы тяжести не искажало краевой угол, каплю надо брать как можно меньше.

При идеальном смачивании $cos\theta$=1.



Сталагмометрический метод (метод счета капель)



$F_т < F_н$ – капля висит

$F_т = F_н$ – момент отрыва

$F_т > F_н$ – капля падает

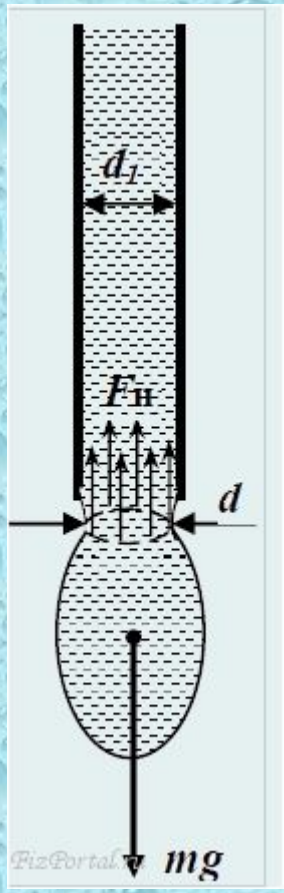
$$m_к g = \sigma l$$

$$\frac{m_ж}{n} g = \sigma 2\pi r$$

$$\frac{V_ж \rho}{n} g = \sigma 2\pi r$$

$$\sigma = \frac{V_ж \rho}{2\pi r} \frac{1}{n}$$

n – количество капель

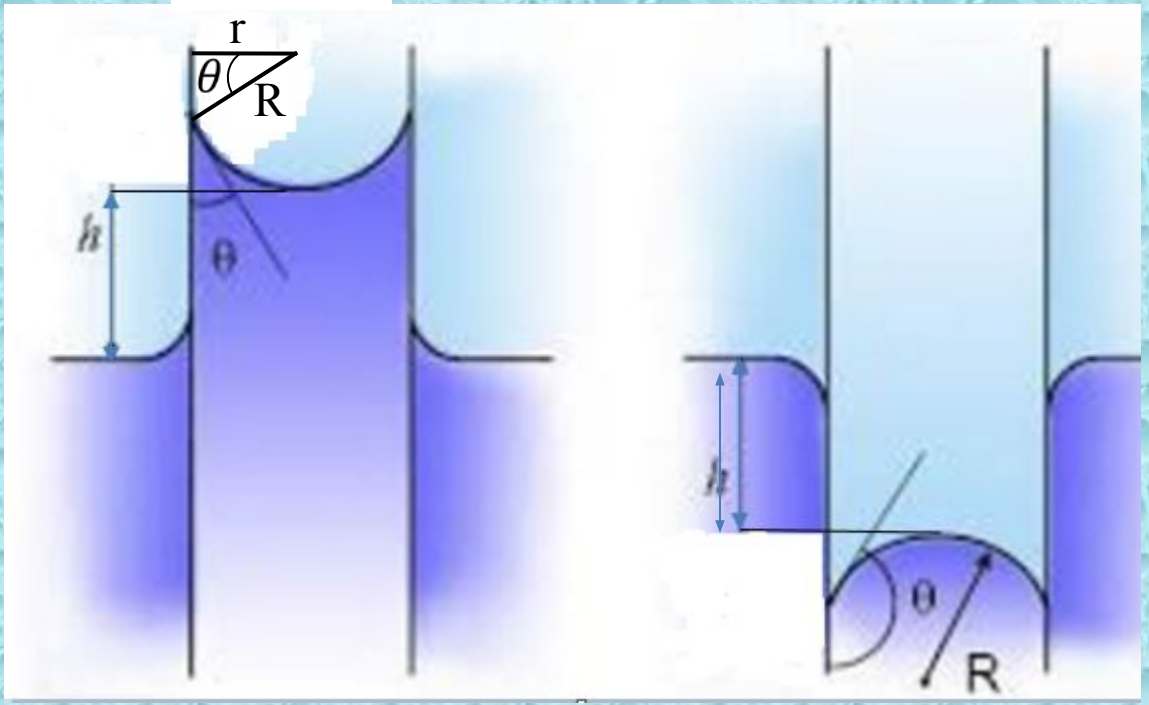


Под действием поверхностного натяжения свободная поверхность капель жидкости стремится принять шарообразную форму, соответствующую наименьшей поверхностной энергии и наименьшей площади свободной поверхности. Их форма тем ближе к шаровой, чем меньше вес капель, поскольку для малых капель сила поверхностного натяжения превосходит силу тяжести.

Форма и размер капель, отрывающихся от конца капиллярной трубки, зависят не только от силы поверхностного натяжения, но и от диаметра трубки и плотности вытекающей жидкости.

Капиллярные явления

$$cos\theta = \frac{r}{R}$$



Формула Лапласа:

$$\Delta p = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

Для сферической поверхности $R_1 = R_2$:

$$\Delta p = \sigma\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R}\right) = \frac{2\sigma}{R}$$

Жидкость поднимается по капилляру, пока давление Лапласа не уравновесит давление столба жидкости:

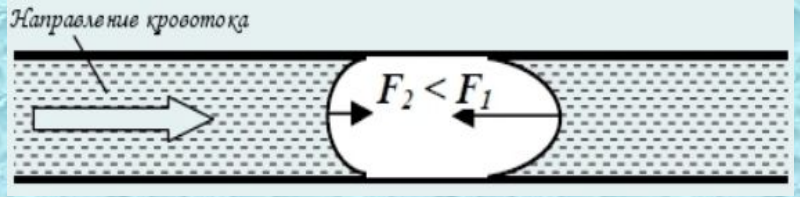
$$\frac{2\sigma}{R} = \rho g h \rightarrow h = \frac{2\sigma}{R\rho g} = \frac{2\sigma cos\theta}{r\rho g}$$

R – радиус мениска
r – радиус капилляра
h – высота поднятия жидкости в капилляре
ρ – плотность жидкости

Газовая эмболия

С поверхностным натяжением связано и явление газовой эмболии, при котором пузырек газа способен затруднить и даже остановить кровоток в мелких сосудах и лишить кровоснабжения какой-либо орган, что может привести к серьезному функциональному расстройству и даже летальному исходу.

Пока диаметр газового пузырька меньше диаметра сосуда, он имеет сферическую форму и движется вместе с током крови. Если он попадает в мелкий сосуд, диаметр которого меньше диаметра пузырька, его мениски деформируются под действием динамического давления текущей крови: передний по току крови мениск вытягивается, его радиус кривизны уменьшается, а задний под напором крови уплощается, его радиус кривизны увеличивается. Соответственно, дополнительные молекулярные давления, действующие на эти мениски, будут не одинаковы и направлены навстречу, а их результирующая сила, приложенная к пузырьку, будет направлена против тока крови, противодействуя ему



Таким образом, попавшие в кровь пузырьки воздуха способны закупорить мелкие сосуды. Воздушная эмболия может возникнуть при ранении крупных вен, где давление крови ниже атмосферного, при неправильно проведенных внутривенных инъекциях и в других ситуациях.

Газовые пузырьки в крови человека и животных могут появиться и при резком снижении внешнего давления на организм, что обусловлено уменьшением растворимости газов (в первую очередь − азота) в крови и переходом их из растворенного состояния в газообразное вследствие резкого снижения окружающего давления. С подобной проблемой могут столкнуться водолазы при быстром подъеме с большой глубины на поверхность (кессонная болезнь), летчики и космонавты при разгерметизации кабины или скафандра на большой высоте.

Перечень тем на экзамен по дисциплине «медицинская и биологическая физика» для специальности лечебное дело

Механика и свойства жидкости.

Стационарное течение. Поток. Условие неразрывности струи. Вязкость жидкости (определение, чем обусловлена, как зависит от температуры). Единицы измерения коэффициента вязкости в СИ и медицинской практике. Закон Ньютона для вязкой жидкости. Ньютоновские и неньютоновские жидкости. Течение вязкой жидкости по трубам. Зависимость скорости течения жидкости от расстояния до оси трубы (формула, график). Где будет максимальная, где минимальная скорость? Формула Пуазейля. Гидравлическое сопротивление. Движение тел в вязкой жидкости. Силы, действующие на тело, падающее в вертикальном столбе жидкости. Закон Стокса. Методы определения вязкости жидкости (метод падающего шарика, ротационный вискозиметр, капиллярный вискозиметр). Вязкость крови. Чем обусловлена? Как изменяется при патологиях? Методы измерения (медицинский вискозиметр Гесса). Ламинарное и турбулентное течение. Кинематическая вязкость. Число Рейнольдса. Критическая скорость.

Особенности молекулярного строения жидкостей (ближний порядок, время оседлой жизни, энергия активации, зависимость времени релаксации от температуры жидкости и энергии активации). Поверхностное натяжение жидкости и его зависимость от температуры. Методы определения поверхностного натяжения (метод отрыва кольца, сталагмометрический метод). Смачивание и несмачивание. Капли жидкости на поверхности твердого тела. Краевой угол. Формула для косинуса краевого угла. Гидрофобная и гидрофильная поверхность. Идеальное смачивание. Дополнительное давление мениска жидкости (формула Лапласа). Капилляры. Поведение жидкости при опускании капилляра в сосуд с жидкостью. Выпуклый и вогнутый мениск. Высота поднятия жидкости в капилляре. Значимость капиллярных явлений в кровеносной системе человека. Эмболия.