

Лекция №4
Методы определения
вязкости жидкости

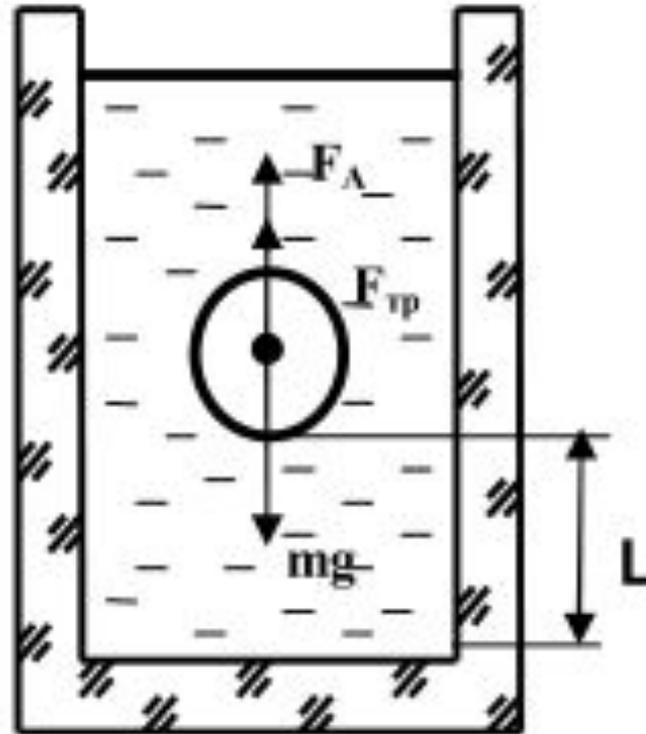
Определение вязкости биологических жидкостей и, особенно, вязкости крови имеет существенное диагностическое значение. Разнообразные приборы, применяемые для этой цели называют **вискозиметрами**.

Существуют следующие методы определения вязкости жидкости:

- а) Метод Стокса (метод падающего шарика).**
- б) Капиллярные методы**
- в) Ротационные методы**

а) Метод Стокса (метод падающего шарика)

Представим цилиндр, заполненный жидкостью плотностью $\rho_{\text{ж}}$, вязкость которой η подлежит определению



Если в этой жидкости падает шарик радиусом r , массой m и плотностью ρ , то движение шарика определяется действующими на него тремя силами:

• силой тяжести

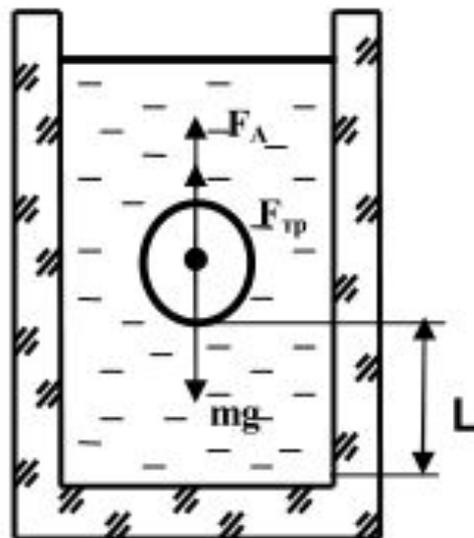
$$F_T = mg$$

• силой Архимеда

$$F_A = \frac{4\pi r^3 \rho_{жс} g}{3}$$

• силой трения

$$F_{TP}$$



Согласно **закону Стокса**, сила сопротивления движению шарика $F_{\text{ТР}}$ пропорциональна его радиусу, скорости движения и вязкости жидкости:

$$F_{\text{ТР}} = 6\pi\eta r v$$

Сила трения уменьшает скорость движения шарика и через некоторое время после погружения шарика в жидкость его движение может стать равномерным.

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

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

Отсюда определим искомую вязкость:

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

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

Скорость движения шарика v определяется экспериментально. Для этого измеряется время t , за которое шарик равномерно проходит в жидкости расстояние L :

$$v = \frac{L}{t}$$

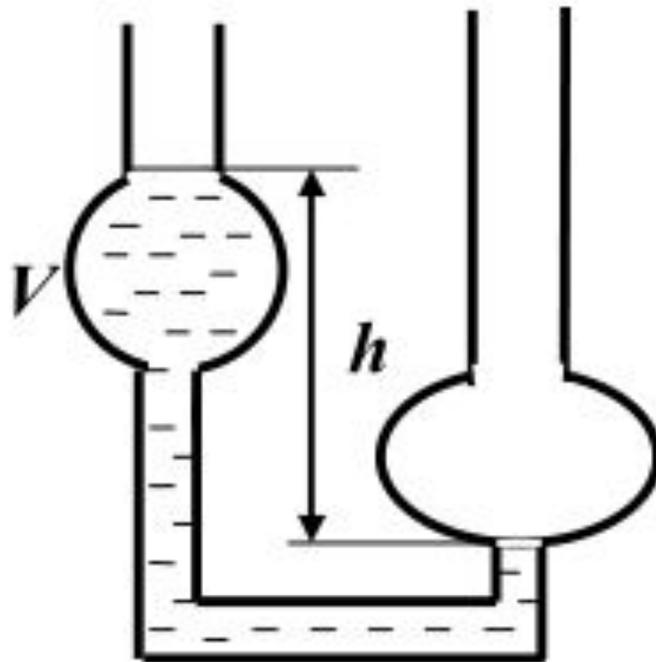
Метод Стокса обладает хорошей точностью, однако, для определения вязкости крови он практически не применяется потому, что:

- требует значительного количества исследуемой крови.
- в жидкостях, обладающих не очень большой вязкостью, сложно удовлетворить требованию равномерности движения шарика.

б) Капиллярные методы

Капиллярные методы, основаны на применении формулы Пуазейля. Рассмотрим течение жидкости через капилляр в вискозиметре Оствальда.

Представим U - образную трубку. В одном из ее плеч имеется небольшая полая сфера, объемом V , которая капилляром соединяется с резервуаром, расположенным в другом плече. Эта система заполняется жидкостью так, что разность ее уровней составляет величину h .



Пусть вначале вискозиметр заполнен эталонной жидкостью, вязкость которой точно известна. В качестве такой жидкости удобно использовать дистиллированную воду.

Поскольку при засасывании воды в левое плечо вискозиметра ее уровень здесь выше, чем в правом, то после прекращения всасывания жидкость будет перетекать через капилляр из левого плеча вискозиметра в правое до наступления равенства уровней. С помощью секундомера легко определить время t_0 , за которое вода вытекает из полости объемом V .

Объем **вытекшей** воды равен:

$$V = \frac{\pi r^4 \rho_0 g h}{8 \eta_0 L} t_0$$

Где

$\rho_0 g h$ - разность давлений ,

ρ_0 - плотность воды,

η_0 - табличное значение вязкости воды при данной температуре.

Определив время истечения воды t_0 , заполним вискозиметр исследуемой жидкостью, вязкость которой необходимо определить. При этом необходимо обеспечить такую же разность уровней жидкости h в плечах вискозиметра, что и при его заполнении водой.

Затем измеряем время t истечения объема **исследуемой** жидкости V , который определяется формулой:

$$V = \frac{\pi r^4 \rho g h}{8 \eta L} t$$

где

η - вязкость исследуемой жидкости,

ρ - плотность исследуемой жидкости.

Приравнивая правые части уравнений для объема **вытекшей** и **исследуемой** жидкости

$$\frac{\pi r^4 \rho_0 g h}{8 \eta_0 L} t_0 = \frac{\pi r^4 \rho g h}{8 \eta L} t$$

получим формулу для определения вязкости исследуемой жидкости

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho t}{\rho_0 t_0}$$

Для определения вязкости проб крови может быть использован вискозиметр Гесса, в котором определяются не времена истечения жидкости из капилляра, а расстояния L_0 и L , на которые перемещаются вода и кровь за одно и то же время. Применение формулы Пуазейля для этого случая приводит к следующей расчетной формуле, определяющей вязкость крови η :

$$\eta = \eta_0 \frac{L_0}{L}$$

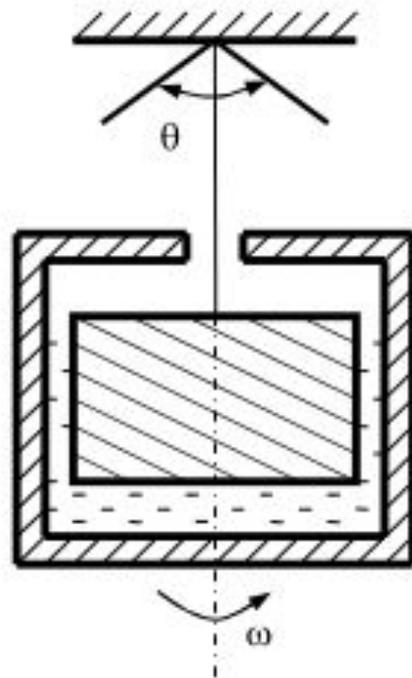
в) Ротационные методы

Достоинством этих методов является возможность определять не только значение вязкости, но и ее зависимость от скорости сдвига:

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

Существуют разнообразные ротационные вискозиметры.

Рассмотрим принцип устройства одного из них. Представим два цилиндра, имеющих общую ось вращения.



Внутренний цилиндр подвешен на нити, а внешний может вращаться вокруг своей продольной оси с регулируемой угловой скоростью ω . Зазор между цилиндрами заполняется исследуемой жидкостью, в частности, кровью.

За счет вязкости жидкости при вращении наружного цилиндра внутренний цилиндр начинает поворачиваться, достигая равновесия при некотором угле поворота θ .

Этот угол можно легко измерить.

Чем больше вязкость жидкости и угловая скорость вращения ω , тем больше и указанный угол поворота:

$$\theta = k \eta \omega$$

где k - постоянная прибора.

$$\eta = \frac{\theta}{k\omega}$$

При разных значениях скорости ω в жидкости, заполняющей зазор между цилиндрами, реализуются и различные градиенты скорости. Для **НЬЮТОНОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ** значение вязкости не зависит от градиента скорости (следовательно и от величины ω),

а в **НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЯХ** эту зависимость можно не только наблюдать, но и определить количественно.

Таким образом, данные ротационной вискозиметрии позволяют судить об изменении вязкости движущейся крови при различных скоростях сдвига.

***Условия перехода
ламинарного течения
жидкости в
турбулентное***

Характер течения жидкости - ламинарный или турбулентный – зависит:

- от плотности жидкости ρ ,
- ее вязкости η ,
- скорости течения v ,
- диаметра трубы d , по которой течет жидкость.

Оказывается, что некоторая комбинация этих величин - один безразмерный параметр - может определять условия перехода ламинарного течения жидкости в турбулентное. Таким параметром является число Рейнольдса (**Re**) :

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

- ✓ Если число Рейнольдса не превышает некоторого критического значения $Re < Re_{кр}$, течение жидкости ламинарно.
- ✓ Если же $Re > Re_{кр}$, то в потоке жидкости возникают завихрения - ее течение становится турбулентным.

Значение критического числа Рейнольдса можно определить экспериментально.

Представим, что по гладкой цилиндрической трубе протекает вода с регулируемой и измеряемой скоростью v , которая представляет собой среднюю по сечению трубы скорость течения.

Плотность воды, ее вязкость и диаметр трубы известны.

Допустим, что труба прозрачна и переход течения жидкости из ламинарного в турбулентное можно определить визуально.

Постепенно увеличивая скорость течения, отметим то ее значение $v_{кр}$, при котором в потоке жидкости начинает проявляться турбулентность. Подставив это значение $v_{кр}$ в формулу

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

получим величину критического числа Рейнольдса. Для гладких труб

$$Re_{кр} = 2300.$$

Если $Re_{кр}$ известно, то становится возможным для любой жидкости и разных условий ее течения предсказать, будет ли ее поток ламинарным или турбулентным.

Пример. Вода течет по трубе диаметром $d = 2$ мм. При какой скорости \mathbf{v} ее течение становится турбулентным?

Решение. Примем вязкость воды $\eta = 10^{-3}$ Па·с, плотность $\rho = 10^3$ кг/м³ и подставим эти значения в правую часть формулы числа Рейнольдса. В левую часть подставим значение критического числа Рейнольдса.

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

Из образовавшегося уравнения:

$$2300 = \mathbf{v} \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} / 10^{-3}$$

найдем, что течение воды в этой трубе становится турбулентным при скорости

$$\mathbf{v} = 1,15 \text{ м/с}$$

С увеличением диаметра трубы и уменьшением вязкости жидкости переход из ламинарного течения в турбулентное наступает при уменьшающихся значениях скорости.