Лекция 15

Явления переноса.

Жидкое состояние вещества

Физическая кинетика

Раздел молекулярной физики, в котором изучаются процессы, возникающие при нарушении равновесия, носит название *физической кинетики*.

флуктуации температуры, концентрации, скорости перемещения какой-либо части системы относительно других ее частей

применение двух основных методов описания: *гидродинамического* и *кинетического*

Термодинамические потоки, связанные с переносом вещества, энергии или импульса из одной части среды в другую, возникают в случае, если значения тех или иных физических параметров различны в различных точках среды

Физическая кинетика

явление диффузии – процесс самопроизвольного выравнивания концентраций веществ в смесях

явление теплопроводности, приводящее к выравниванию температуры в различных точках среды

Для количественного описания термодинамического потока вводят величину $\mathfrak{I}$, численно равную количеству физической величины, переносимой за одну секунду через выбранную поверхность

$$\mathfrak{I} = \int_S \vec{j} d\vec{S}$$

Физическая кинетика

$$\Im = \int_S \vec{j} d\vec{S}$$

$$j$$

$\vec{j}$ – плотность термодинамического потока; $d\vec{S}$ – вектор, численно равный величине элементарной поверхности dS и направленный по нормали к этой поверхности.

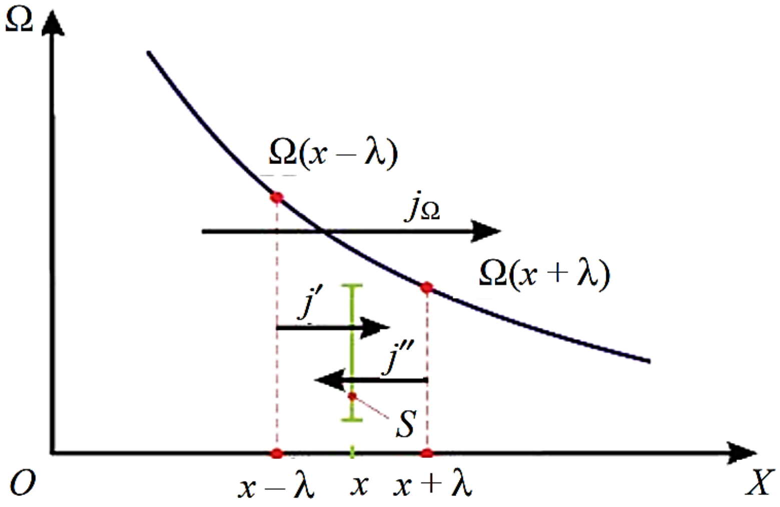
термодинамический поток однороден $\Im = jS$

Если рассматриваемая термодинамическая система находится в состоянии, близком к равновесию

$$\vec{j}_\Omega = -\beta_\Omega grad\, \Omega$$

β_Ω – *коэффициенты переноса* или *кинетические коэффициенты*

Описание явлений переноса



плотность потока частиц j в любом из направлений

$$j = \frac{1}{6} < v > n$$

В случае выполнения *принципа равновесия*

$$j' = j'' = j, \qquad \Im' = \Im'' = \Im = jS$$

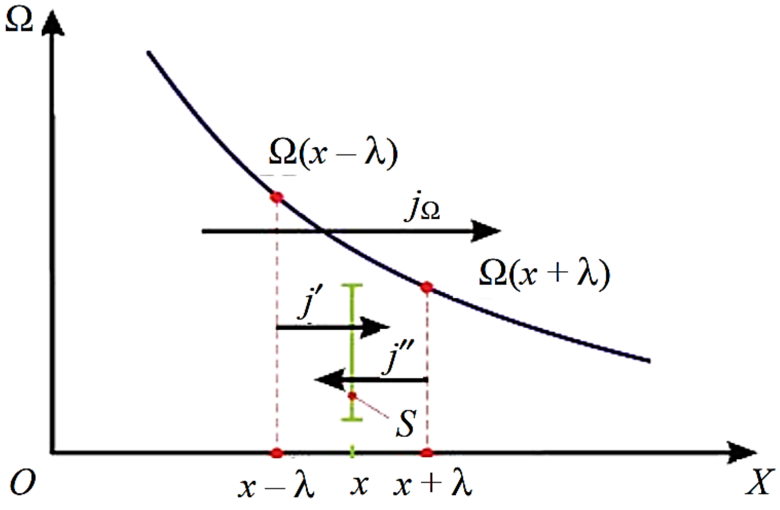
По оси x $\quad \Omega(x - \lambda)$

Против оси $\quad \Omega(x + \lambda)$

λ – длина свободного пробега

Описание явлений переноса

$$j_\Omega = j'\Omega(x-\lambda) - j''\Omega(x+\lambda) = \frac{1}{6} < v > n[\Omega(x-\lambda) - \Omega(x+\lambda)]$$



$\lambda \ll$

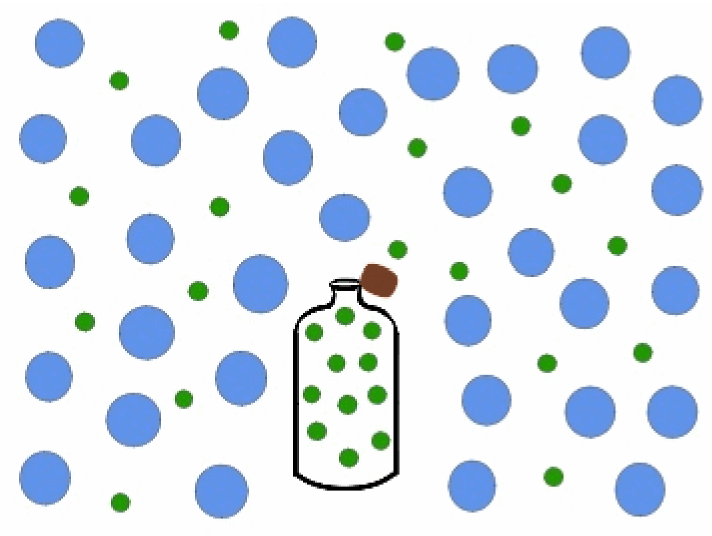
$$\Omega(x \pm \lambda) = \Omega(x) \pm \frac{d\Omega}{dx}\lambda$$

$$\Omega(x-\lambda) - \Omega(x+\lambda) = -2\lambda\frac{d\Omega}{dx}$$

$$j_\Omega = -\frac{1}{3} < v > n\lambda\frac{d\Omega}{dx}$$

$$\Im_\Omega = -\frac{1}{3} < v > n\lambda S\frac{d\Omega}{dx}$$

Диффузия в газах



оба газа имеют практически одинаковые молекулы

$$n = n_1 + n_2$$

концентрация диффундирующего газа n_1 зависит только от одной координаты x: $n_1 = n_1(x)$

Ω – *относительная концентрация газа*

$$\Omega(x) = \frac{n_1(x)}{n}$$

Диффузия в газах

уравнение диффузии

$$j_{n_1} = -\frac{1}{3} < v > \lambda \frac{dn_1}{dx}$$

$$\mathfrak{J}_{n_1} = -DS\frac{dn_1}{dx}$$

$D = \frac{1}{3} < v > \lambda$ называется *коэффициентом диффузии*

$$\mathfrak{J}_{\rho_1} = m\mathfrak{J}_{n_1}$$

Уравнение Фика

$$\mathfrak{J}_{\rho_1} = -DS\frac{d\rho_1}{dx}$$

Диффузия в газах

длина свободного пробега $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n}$

Средняя скорость $< v > = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$

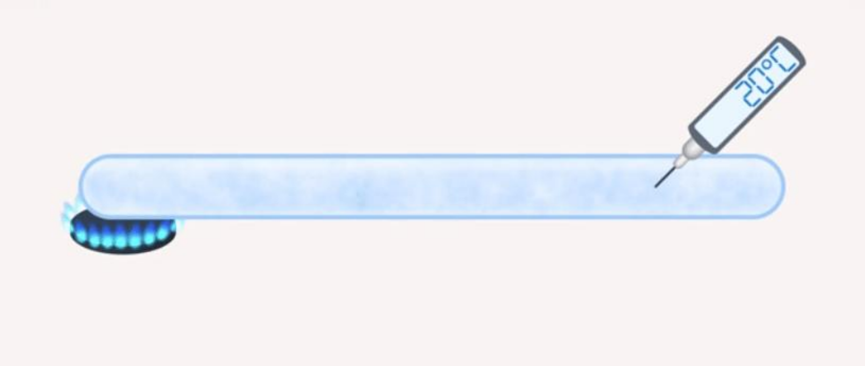
Коэффициент диффузии

$$D = \frac{1}{3\sigma n}\sqrt{\frac{4kT}{\pi m}}$$

$$D \sim \sqrt{T}, \qquad D \sim \frac{1}{n}$$

Теплопроводность

$$\Omega(x) = \frac{i}{2} kT(x)$$



Уравнение теплопроводности

$$j_Q = -\frac{1}{3} < v > n_0 \lambda \frac{i}{2} k \frac{dT}{dx}$$

Закон Фурье

$$\mathfrak{I}_Q = -\kappa S \frac{dT}{dx}$$

Теплопроводность

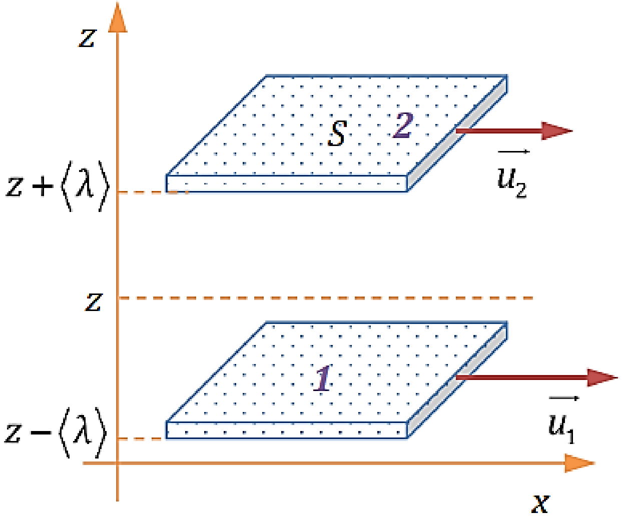
Коэффициент теплопроводности

$$\kappa = \frac{1}{3} < v > \lambda c_V \rho$$

$$\kappa = \frac{c_V}{3\sigma} \sqrt{\frac{4mkT}{\pi}}$$

Вязкость газов

$$\Omega(x) = mu(z)$$



$u(z)$ – скорость течения газа в направлении, перпендикулярном оси OZ, в точке с координатой z: $u = u(z)$

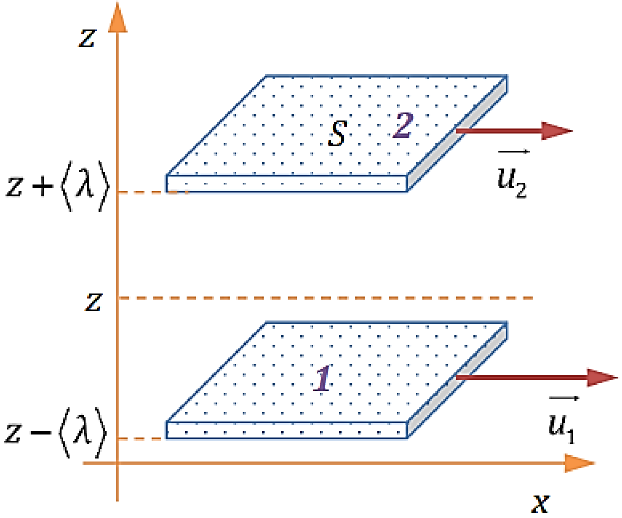
$$j_p = -\frac{1}{3} < v > \lambda\rho \frac{du}{dz}$$

Закон Ньютона

$$\Im_p = -\eta S \frac{du}{dz}$$

Вязкость газов

Коэффициент вязкости

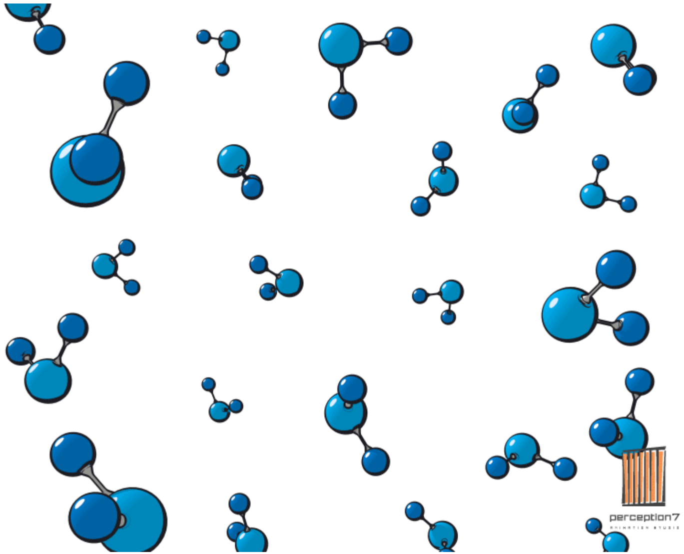


$$\eta = \frac{1}{3} < v > \lambda\rho$$

$$\eta = \frac{1}{3\sigma}\sqrt{\frac{4mkT}{\pi}}$$

$$\kappa = c_V\eta = c_V\rho D$$

Жидкое состояние вещества



в жидкостях существует *ближний порядок* расположения молекул

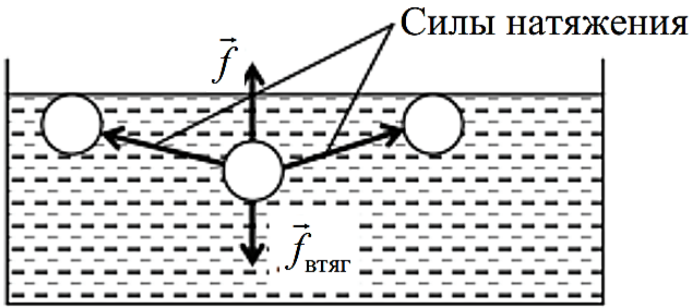
сжимаемость жидкостей, т.е. изменение объема при изменении давления, очень мала

Жидкости, как и твердые тела, изменяют свой объем при изменении температуры

$$\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta T$$

β – *температурный коэффициент объемного расширения*

Поверхностное натяжение



особенностью жидкостей является наличие *свободной поверхности*

существует некоторая равнодействующая сила, направленная в сторону объема жидкости или в объем пограничной среды

Для перемещения молекулы к поверхности следует совершить работу внешними силами

Если молекула переместится с поверхности внутрь жидкости, силы межмолекулярного взаимодействия совершат положительную работу.

Поверхностное натяжение

чтобы вытащить некоторое количество молекул из глубины жидкости на поверхность (т. е. увеличить площадь поверхности жидкости), внешние силы должны совершить положительную работу

$$\Delta A_{\text{внеш}} = \sigma S$$

Коэффициент σ называется коэффициентом *поверхностного натяжения* ($\sigma > 0$).

молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избыточной по сравнению с молекулами внутри жидкости *потенциальной энергией*

$$E_p = A_{\text{внеш}} = \sigma S$$

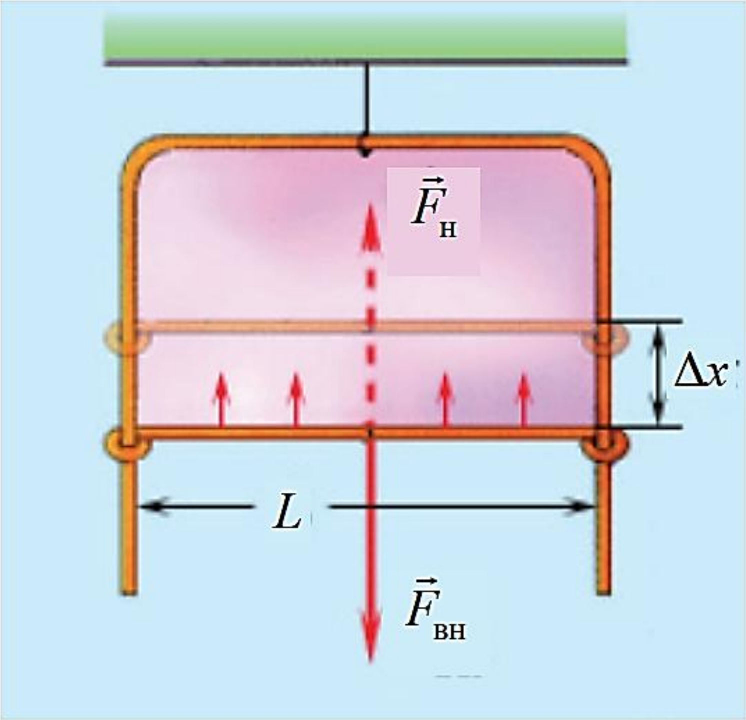
Поверхностное натяжение

свободная поверхность жидкости стремится сократить свою площадь

Жидкость ведет себя так, как будто по касательной к ее поверхности действуют силы, сокращающие (стягивающие) эту поверхность. Эти силы называются *силами поверхностного натяжения*

Энергия, которая характеризует способность какой-либо системы совершать работу при изотермическом изменении ее состояния, называется *свободной энергией*

Поверхностное натяжение



Если в мыльный раствор опустить проволочную рамку, одна из сторон которой подвижна, то вся она затянется пленкой жидкости

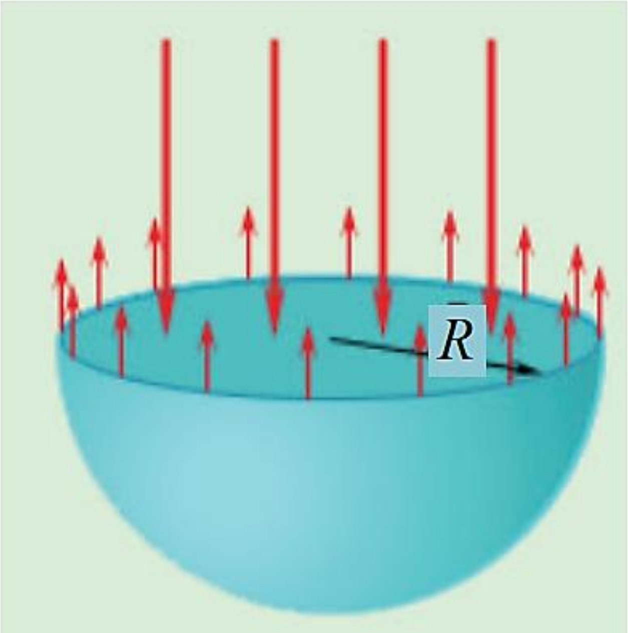
Для равновесия подвижной стороны рамки $F_{вн} = F_{н}$

$$\Delta A_{вн} = F_{вн}\Delta x = \Delta E_p = \sigma \Delta S = \sigma \cdot 2L\Delta x$$

$$F_{н}\Delta x = \sigma \cdot 2L\Delta x$$

$$\sigma = \frac{F_{н}}{2L}$$

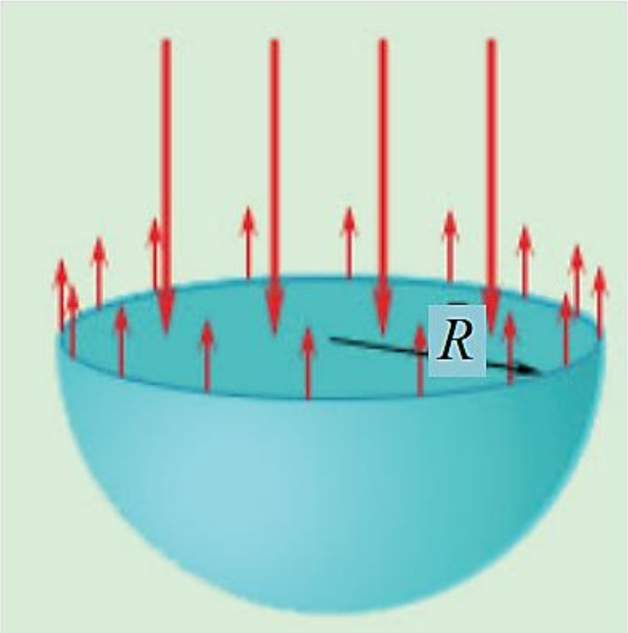
Смачивание



Из-за действия сил поверхностного натяжения в каплях жидкости и внутри мыльных пузырей возникает *избыточное давление*

Если мысленно разрезать сферическую каплю радиуса R на две половинки, то каждая из них должна находиться в равновесии под действием сил поверхностного натяжения, приложенных к границе разреза длиной $2\pi R$, и сил избыточного давления, действующих на площадь πR^2 сечения

Смачивание



Условие равновесия

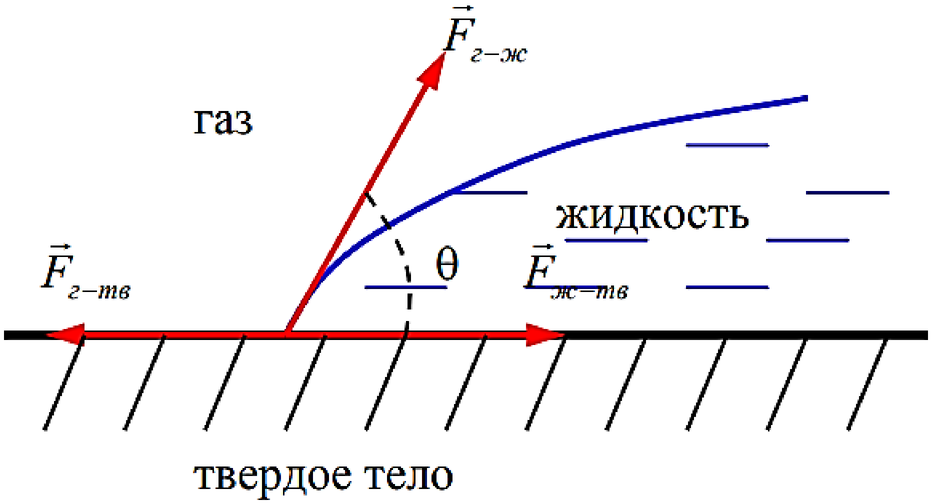
$$\sigma \cdot 2\pi R = \Delta p \pi R^2$$

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}$$

Для поверхности любой формы (не являющейся сферической или цилиндрической) давление, обусловленное кривизной поверхности, выражается *уравнением Лапласа*

$$p = \sigma\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

Смачивание



$\theta = 0$ – полное смачивание

$\theta = \pi$ – полное несмачивание

Если граничат друг с другом сразу три вещества, то система принимает конфигурацию, соответствующую минимуму суммарной энергии

условие равновесия записывается

$$\Delta\ell\sigma_{тг} = \Delta\ell\sigma_{тж} + \Delta\ell\sigma_{жг}\cos\theta$$

$$\cos\theta = (\sigma_{тг} - \sigma_{тж}) / \sigma_{жг}$$

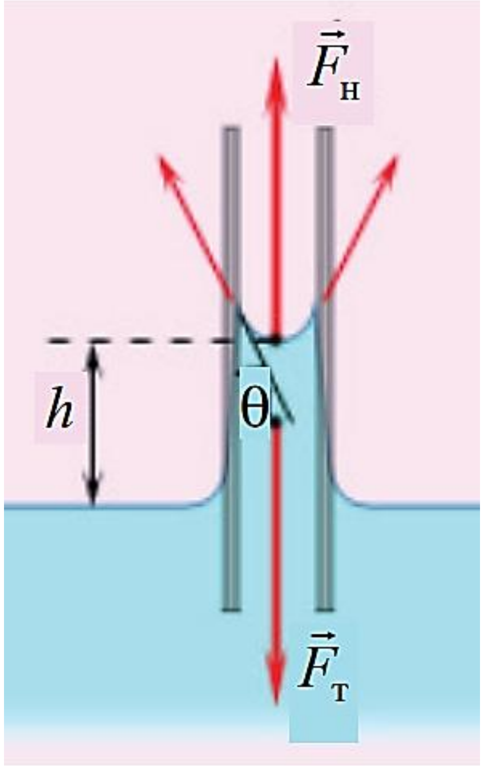
Смачивание

Если размеры сосуда, в котором находится жидкость, или расстояние между поверхностями, ограничивающими жидкость, сравнимы с радиусом кривизны поверхности жидкости, то такие сосуды называются *капиллярными*.

Явления, происходящие в узких сосудах, называются *капиллярными явлениями*

Так как для капиллярных сосудов характерна кривизна поверхности жидкости в них, то естественно, что здесь больше всего сказывается влияние дополнительного давления, вызванного кривизной поверхности (давление Лапласа).
Дополнительное давление вызывает капиллярный подъем.

Смачивание



Высота подъема

$$F_Т = F_Н = mg = \rho h \pi r^2 g = \sigma \cdot 2\pi r \cos\theta$$

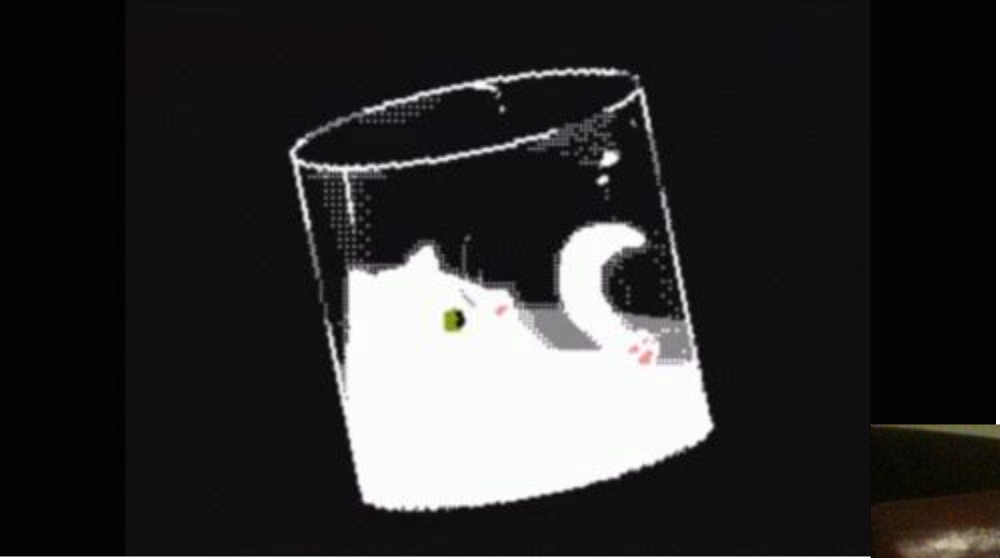
$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{\rho g r}$$

При полном смачивании

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$

При полном несмачивании

$$h = -\frac{2\sigma}{\rho g r}$$



Спасибо
за внимание!

nnkhvastunov@itmo.ru