

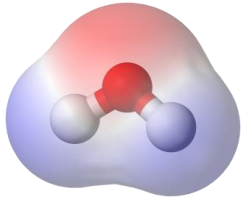
Основы микрофлюидной науки

Якимов Антон

11.01.2014

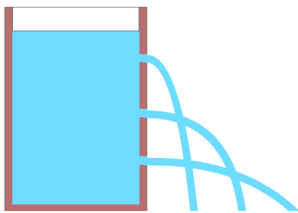
микро + Гидродинамика

Строение

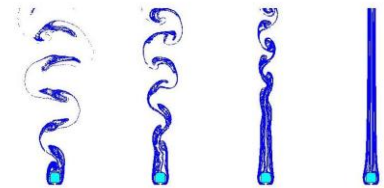


Вязкость

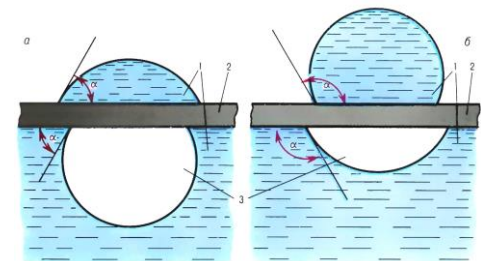
Давление

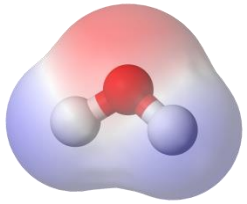


Особые точки



Поверхность





Строение воды

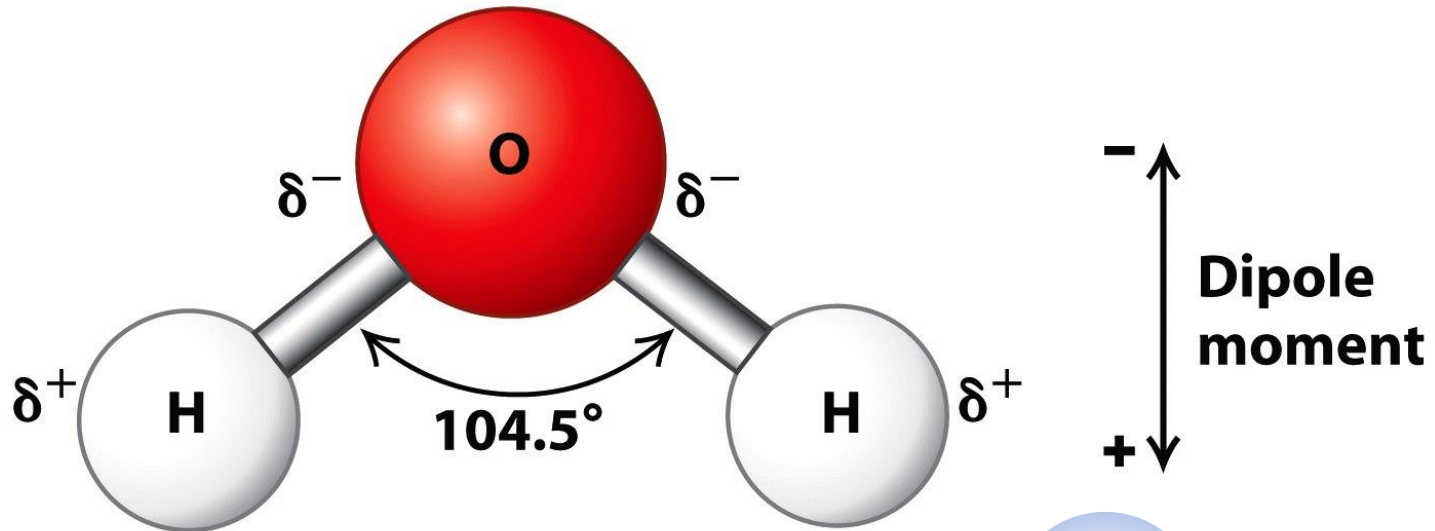
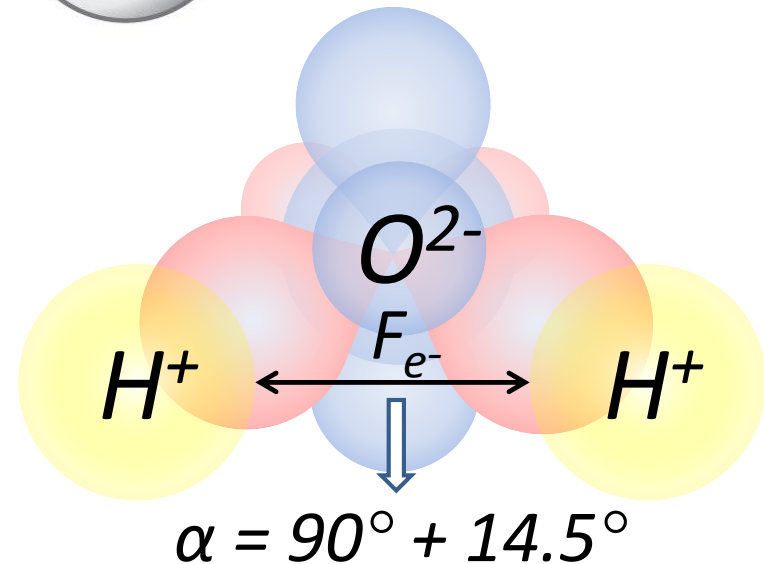
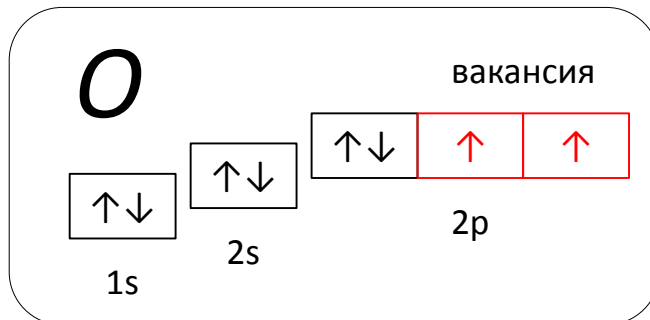
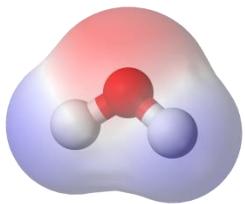
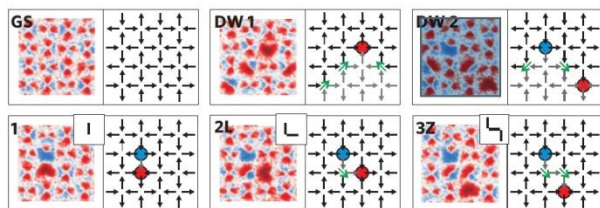
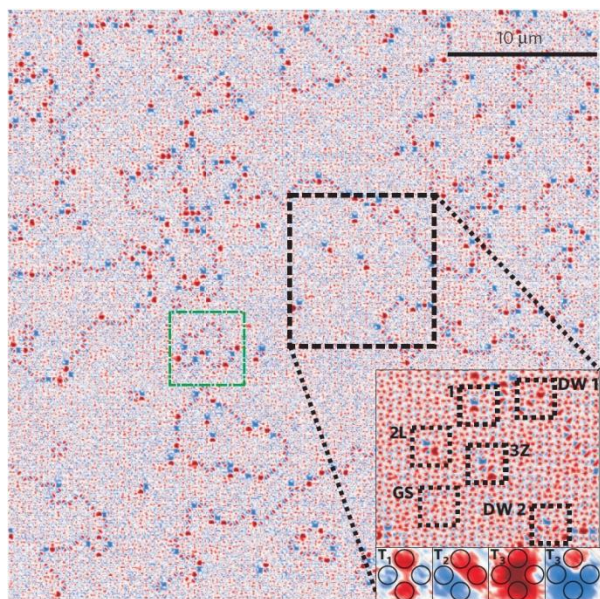


Figure 2-5
Molecular Cell Biology, Sixth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company





Строение воды

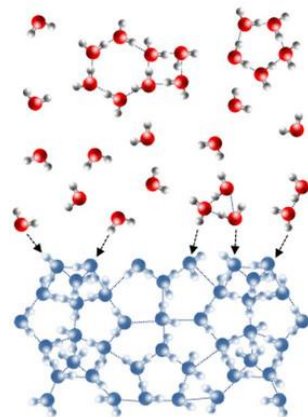


MFM images of a 400-nm-pitch as-grown square ice array.

Morgan et al. // Nature Physics, 2011

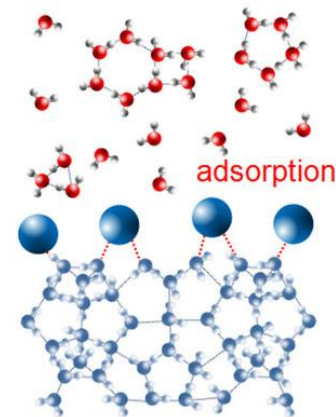
DOI: 10.1038/NPHYS1853

a hydrate formation



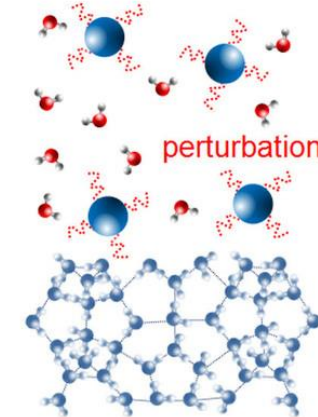
water in liquid phase

b adsorption inhibition

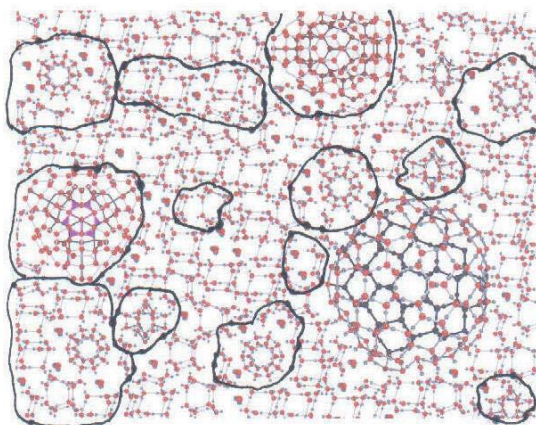


water in hydrate phase

c perturbation inhibition



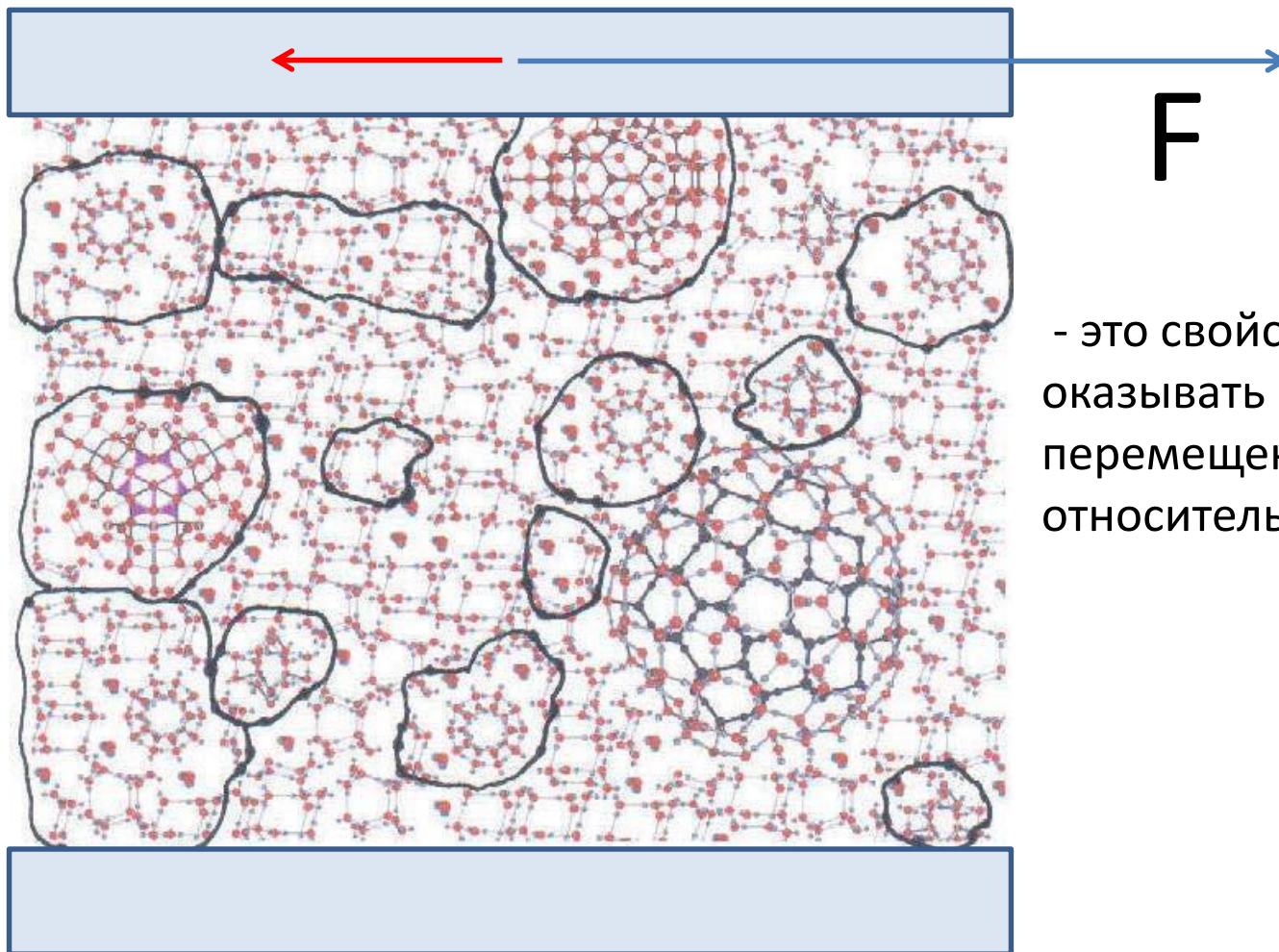
hydrate inhibitor



Sa et al. Scientific Reports 3, 2013

doi:10.1038/srep02428

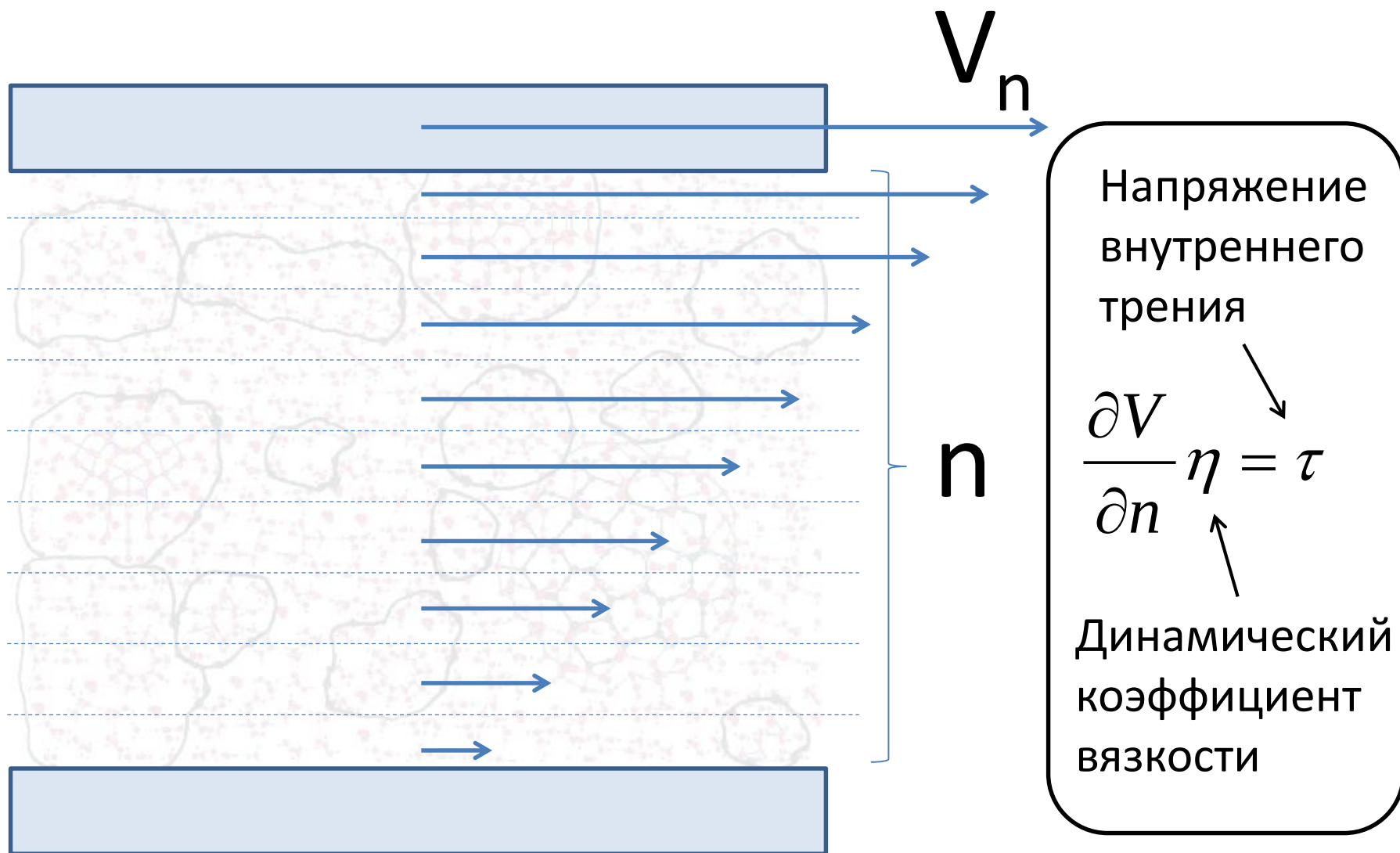
$F_{\text{вн. тр}} = \text{Вязкость}$



- это свойство текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

RusWiki, 11.01.14

Вязкость



Закон вязкости Ньютона

Описывает **ньютоновские жидкости**

$$\frac{\partial V}{\partial n} \eta = \tau$$

Но!

$$\eta = \eta(V, d_c, \rho)$$

- это **НЕньютоновские жидкости**

Например, уравнение Френкеля-Андраде $\eta = Ce^{\frac{W}{kT}}$

Неньютоновские жидкости

(суспензии, эмульсии, растворы и расплавы полимеров и т.п.)

вязкоНЕупругие

не инвариантны по времени
Зависят от продолжительности сдвига

Тиксотропные

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} < 0$$

Реопластические

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} > 0$$

Псевдопластические

$$\tau = -\eta_k \left(\frac{\partial V}{\partial n} \right)^m$$

где η_k – кажущаяся вязкость
 m – константа ($0 < m < 1$)

инвариантны по времени

без предела текучести

Дилатантные

$$\eta_k \sim V,$$

при $m > 1$

вязкоупругие

Частично восстанавливают форму после деформации

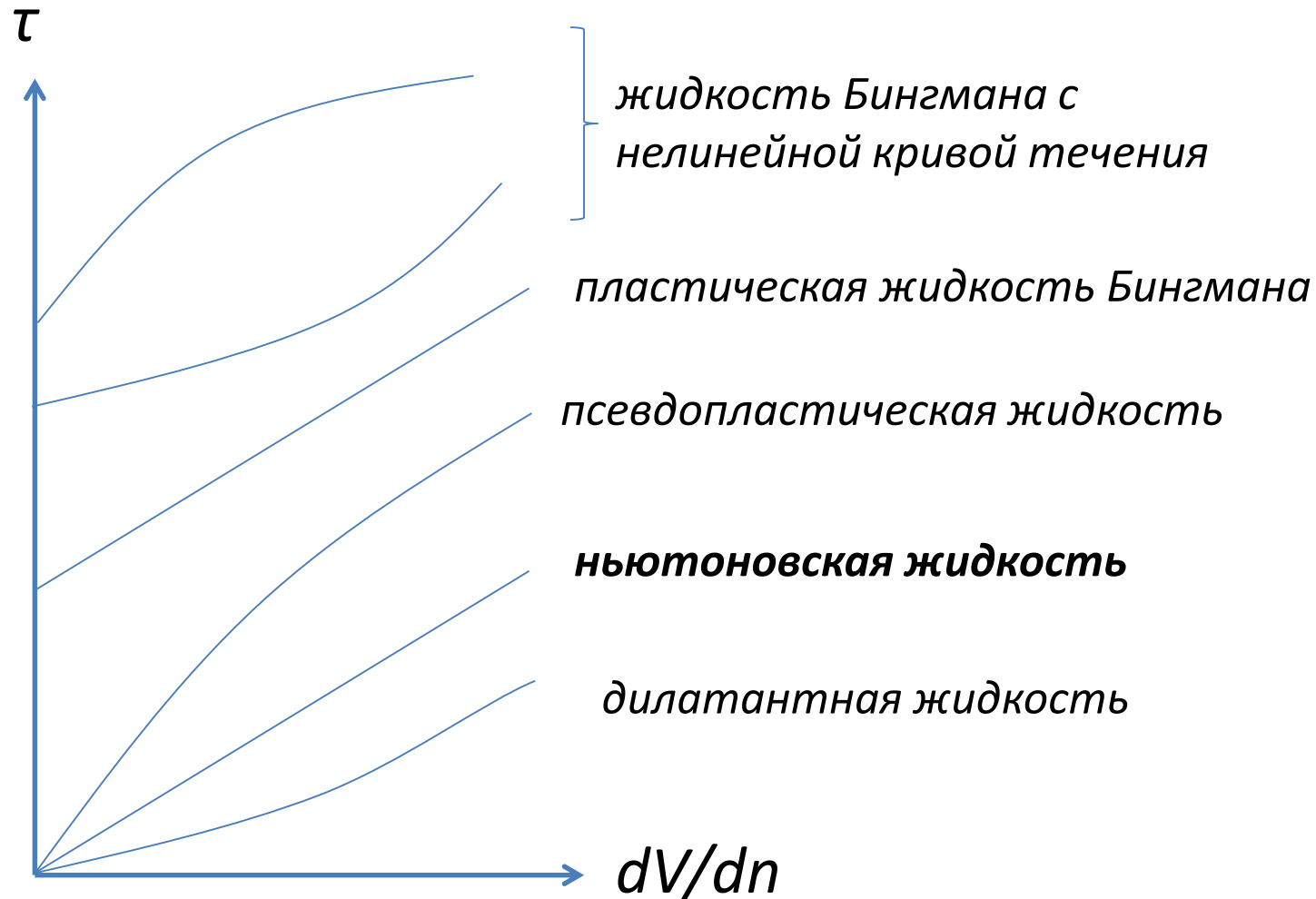
с пределом текучести

пластическая жидкость Бингмана

$$\tau - \tau_0 = \eta_p \frac{\partial V}{\partial n}$$

η_p – пластическая вязкость
 τ_0 – предел напряжения сдвига

Типы жидкости



Кинематическая Вязкость

$$V \sim lt$$

объем в-ва размер дырки время протекания V через отверстие l

$$V = \nu lt$$

$$m = \eta lt$$

$$\frac{m}{V} = \frac{\eta lt}{\nu lt} = \rho$$

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



The University of Queensland
pitch drop experiment

Течение флюидов

Ударные волны

Пересечение поверхностей разрыва

Поверхностные явления

Релятивистская гидродинамика

Пограничные слои

Сжимаемые жидкости

Уравнение непрерывности

Уравнение движения

Обтекание

Особые точки

Гидродинамика горения

Турбуленция

Теплопроводность

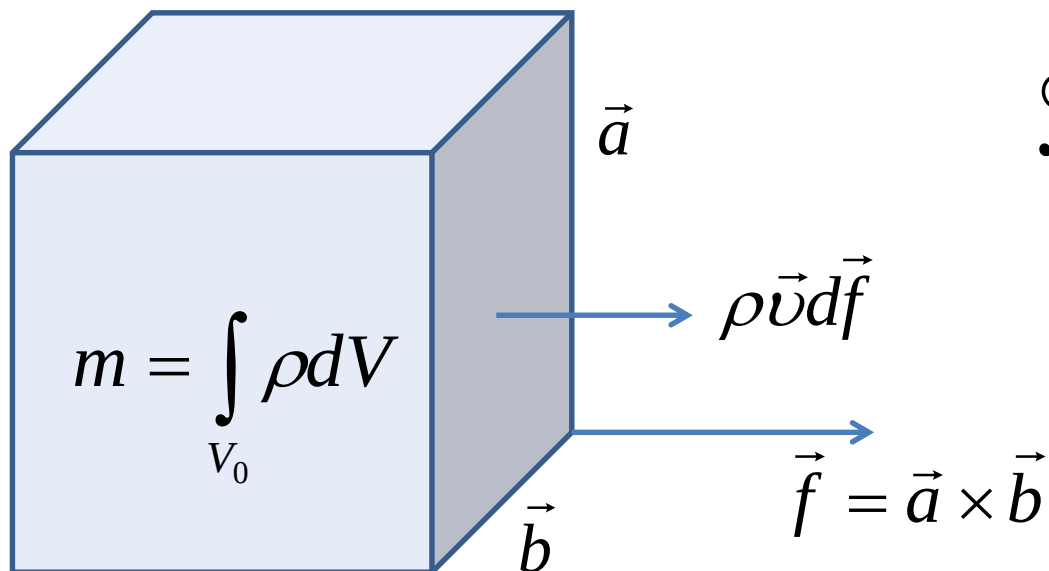
Сверхтекучесть

Диффузия

Колебания и звук

Ламинарное течение

Уравнение непрерывности



$$\oint \rho \vec{v} d\vec{f} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV$$

$$\text{div} F = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Phi_F}{V}$$

$$\int \text{div} F dV = \oint F dS$$

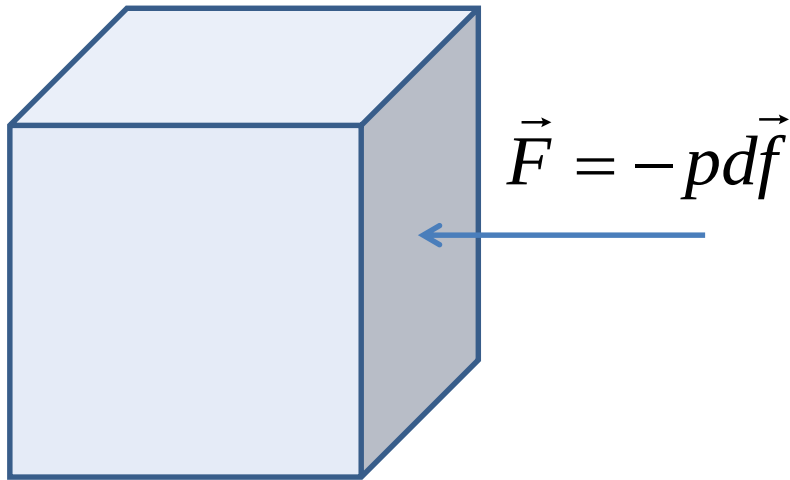
$$\vec{j} = \rho \vec{v} \quad \text{плотность потока жидкости}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{v} = 0$$

$$\int \text{div} \rho \vec{v} dV = -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV$$

$$\int \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{v} \right) dV = 0$$

Уравнение Эйлера (ламинарность)



$$-\oint p d\vec{f}$$

$$-\oint p d\vec{f} = -\int \text{grad } p dV$$

$$dm \frac{d\vec{v}}{dt} = -\text{grad } p dV$$

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\text{grad } p = -\nabla p$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \nabla \right) \vec{v}$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \vec{g}$$

$$\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t) = \vec{v}_1(t) + \vec{v}_2(x, y, z)$$

$$d\vec{v}_1 = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} dt$$

$$d\vec{v}_2 = dx \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + dy \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + dz \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = (d\vec{r} \nabla) \vec{v}$$

$$d\vec{v} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} dt + (d\vec{r} \nabla) \vec{v}$$

Уравнение Навье-Стокса

$$\underbrace{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v}}_{\text{Уравнение Эйлера}} = - \underbrace{\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v}}_{\text{Внутреннее трение}}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right) = \nabla (-p + \eta \nabla \vec{v})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0$$