

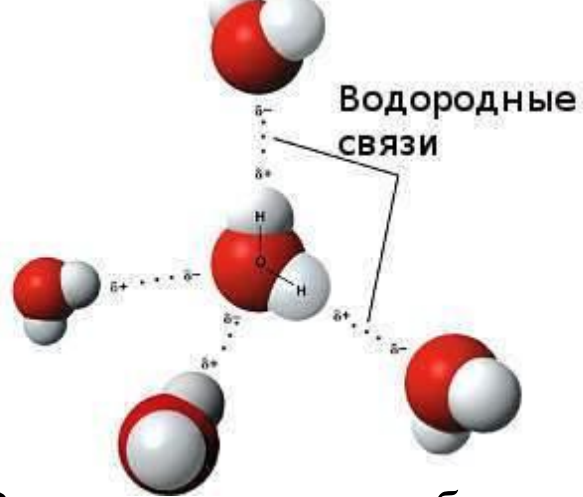
Поверхностное натяжение.

Уравнение Бернулли

Лекция для студентов ВУЗов

Свойства жидкости и газа

- Жидкие тела характерны тем, что **не оказывают сопротивления сдвигу** и поэтому способны изменять свою форму под воздействием сколь угодно малых сил.
- **При изменениях объема**, происходящих в результате внешних воздействий, в жидкости **возникают упругие силы**, в конце концов уравновешивающие действия внешних сил.
- Упругие свойства жидкостей проявляются в том, что отдельные части их действуют друг на друга или на соприкасающиеся с ними тела с **силой, зависящей от степени сжатия жидкости**.
- **Соотношение кинетической и потенциальной энергий в жидкости твердом теле и газе**

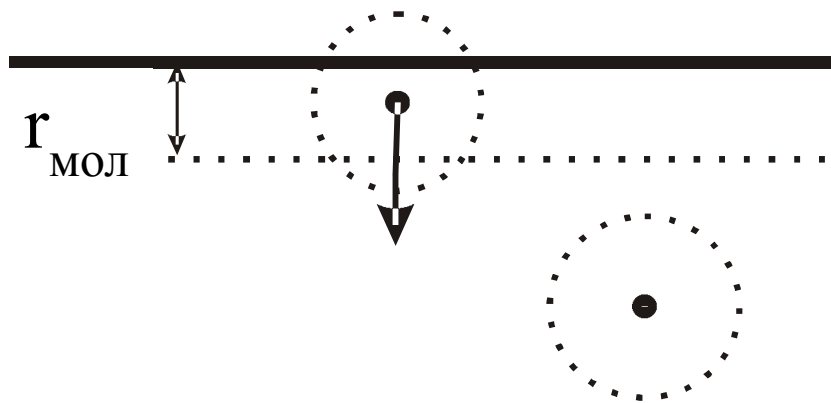


Изменим определение водородной связи ?

Водородные связи образуются между атомом Н, который связан двумя электроотрицательными атомами (кислород или фтор) в той же или соседней молекуле. Принято считать, что взаимодействие имеет электростатическую природу (положительный водород притягивается к электроотрицательному атому). Водородные связи порождают H_2O и закручивают (прошивают) нити ДНК в двойную спираль. Вода жидкость уникальная и обладает максимальной плотностью при температуре $+4^{\circ}C$, а реки и озера промерзают не снизу вверх, а сверху вниз, и в них зимой могут обитать живые существа.

А может быть она частично ковалентна и происходит обобщение электронов водорода и второго образующего связь атома? А определение водородной связи сформулировать так - **это взаимодействие между атомом Н в молекуле с более электроотрицательным атомом, чем водород, или группой атомов в той же или другой молекуле, у которого существуют признаки формирования ковалентной связи?** Ученые сумели визуализировать водородные связи !

Поверхностное натяжение



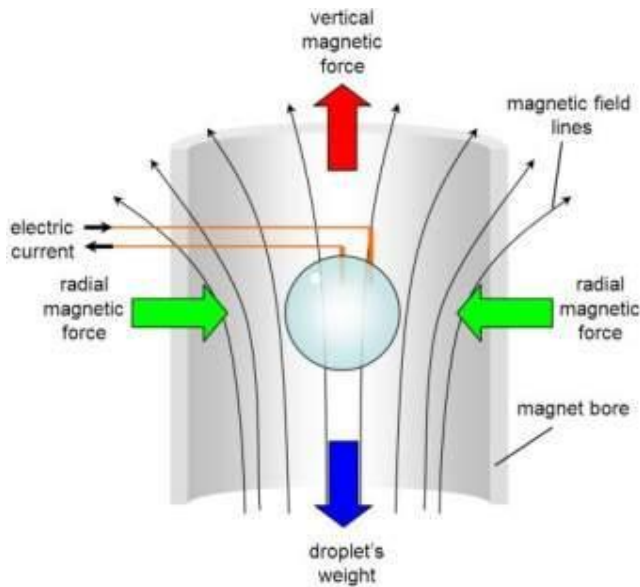
На молекулу **в поверхностном слое** жидкости со стороны окружающих молекул действует результирующая сила, направленная

вглубь жидкости. Обусловлено это просто большой **разницей плотностей жидкости и газа над ее поверхностью**, в котором оказывается часть сферы молекулярного действия, обозначенной на рисунке пунктиром. На молекулу в глубине жидкости со всех сторон действует одинаковое число молекул, поэтому результирующая равна нулю. Есть и силы притяжения и силы отталкивания. Силы притяжения спадают с расстоянием гораздо медленнее. Т.е. силы отталкивания действуют только на очень маленьких расстояниях. **Т.е. отталкивают только окружающие молекулы, а притягивает огромное количество, но внутри их больше (плотность жидкости выше)**

Поверхностное натяжение

- Чтобы молекула из глубины жидкости смогла попасть в поверхностный слой ей нужно **совершить определенную работу против силы притяжения остальных молекул**, что достигается за счет уменьшения ее кинетической энергии, которая при этом **частично** переходит в потенциальную.
- В результате поверхностный слой обладает дополнительной потенциальной энергией. **В положении равновесия потенциальная энергия должна быть минимальна**, все «лишние» для поверхности молекулы втянуты силами притяжения вглубь жидкости и в результате любая жидкость принимает форму **с минимальной поверхностью при данном объеме**.
- Из геометрии известно, что это **шар**. В невесомости, а также если компенсировать силу тяжести другим путем, капли принимают именно эту форму. Как это сделать?

Капля в магнитном поле или черная дыра?



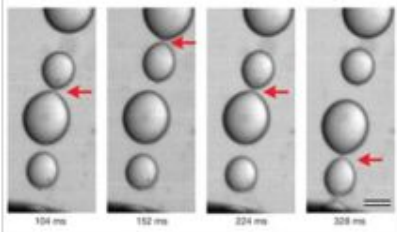
В ядерной физике используется модель капли жидкости для описания ядра. Эксперимент позволят понять, как вращаются ядра, космические объекты и черные дыры. Поверхностное натяжение заставляет свободно падающую каплю принимать сферическую форму. Однако с ростом центробежных сил вращающаяся капля принимает форму эллипсоида, потом делится на две доли (как гантели), на три, четыре, .. пока не примет, в идеале, форму тора.

В частности исследователи космоса предполагают, что горизонт событий черной дыры действует как поверхностное натяжение.

Падающую каплю рассмотрим на следующей лекции.

На Земле в поле силы тяжести диамагнитная капля воды левитирует в градиенте поля сверхпроводящего магнита (16.5 Тесла). С помощью электродов можно регулировать токи, которые вращают каплю. R. J. A. Hill and L. Eaves PRL, 101, 234501 (2008).

Что происходит в туче?



Стрелками показаны места обмена зарядами.

- Установлено, что при напряжении в несколько кВ разноименно заряженные капли воды отталкиваются вместо того, чтобы притягиваться.
- Из-за сил натяжения водяные капли имеют сферическую форму. Однако при сближении двух электрически заряженных сфер их форма начинает меняться - между каплями формируется водяной мостик - опять как и ранее гантель! Возможно что то подобное происходит в грозовой туче? Молния? Площадь мостика постепенно растет и в конце концов две капли сливаются вместе. При больших значениях заряда через мостик происходит обмен зарядами, который заканчивается пробоем. Капли восстанавливают свою изначальную форму и разлетаются друг от друга под воздействием сил натяжения. Это важно учитывать при разработки микрожидкостных чипов – «минилабораторий», оперирующих с микроколичествами жидкостей.



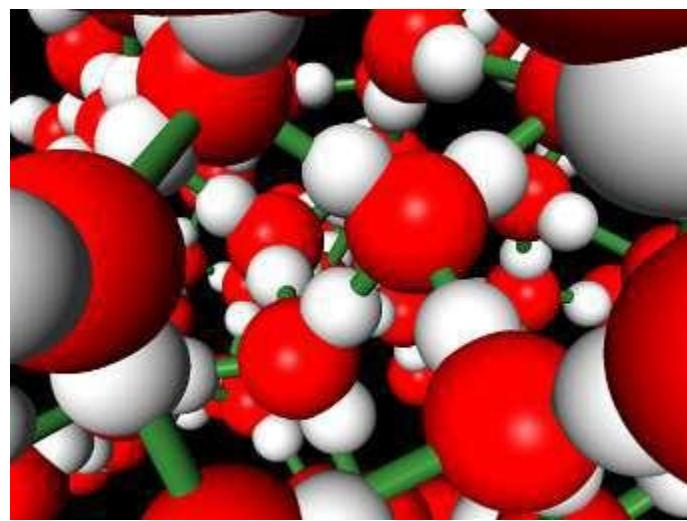
Для капель свои законы ...трения?

Капли во время

опыта

- Как мы знаем сила сухого трения пропорциональной нормальной составляющей силы реакции опоры. Тяжелые сани тащить тяжелее! А жидкую каплю? $F_{тр.ж.} = -bv$?
- **Поместим капли масла объемом несколько микролитров на специальный механический рычаг**, который вращается вокруг оси и меняя угол наклона рычага и скорость вращения (контролировать различные силы, действующие на каплю) заснимем поведение капли камерой. Цель опыта - продемонстрировать, что **в случае движения микроскопических капель жидкости главную роль играют силы, отличные от привычных.**
- Установлено, что **важную роль в движении капли играет поверхностное натяжение**. При некотором соотношении угла наклона и скорости вращения рычага оказалось, что каплям примерно на 27 % легче двигаться по поверхности (то есть капля сверху, поверхность снизу), чем быть подвешенными к ней (то есть поверхность сверху, капля снизу). При этом, во втором случае силы тяжести не мешают току капли, а помогают.

Факультативно: Вода квантовый объект!

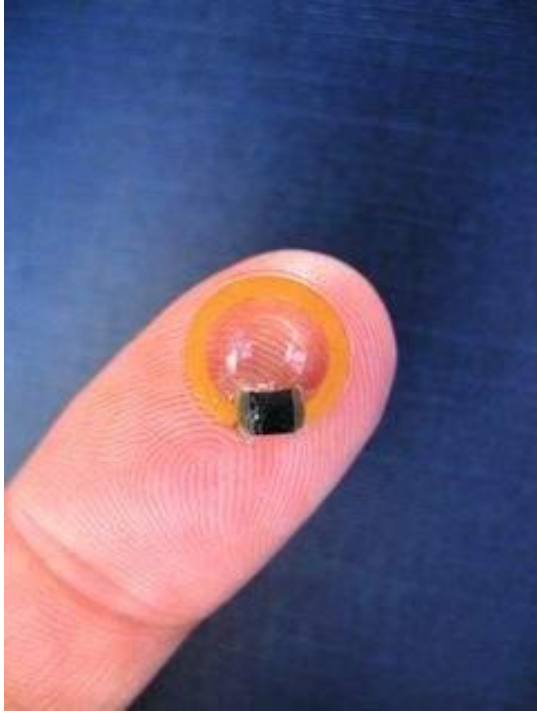


- На расстояниях в нм у молекул H_2O могут появляться новые свойства . Британские ученые отслеживали характер распределения протонов в молекулах воды по уровням энергии. Исследователи заключали молекулы H_2O в сверхпрочные углеродные нанотрубки диаметром 1,6 нанометра, и подвергали систему облучению высокоэнергетичными нейтронами.
- Предполагается , что, когда молекулы воды "сдавлены" в маленьком объеме пространства, протоны в них переходят в новое квантовое состояние. Такие свойства молекул H_2O могут влиять на характер поведения в живых клетках, в которых расстояние между молекулами H_2O приблизительно равно расстоянию в эксперименте.

Давление

- **Давление** – величина которая характеризует воздействие нормальных (перпендикулярных к поверхности) сил , с которыми одно тело действует на поверхность другого.
- **Физика:** $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / 1 \text{ м}^2 = 0.102 \text{ кгс} / \text{м}^2$,
 $1 \text{ кгс} = 9.81 \text{ Н}$ (сила тяжести действующая на 1 кг)
 $1 \text{ мм.рт.ст. (1 торр)} = 133.322 \text{ Па} = 13.6 \text{ мм.вод.ст.}$,
 $1 \text{ атм.} = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 10.1 \cdot 10^4 \text{ Па} = 1.033 \text{ кгс} / \text{см}^2$,
- **Техника:** $1 \text{ атм.} = 1 \text{ кгс} / \text{см}^2 = 9.81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 10.336 \text{ м.вод.ст.}$
- **Метеорология:** $1 \text{ бар} = 1 \text{ дин} / \text{см}^2 = 10^5 \text{ Па} = 0.987 \text{ атм.}$
- **Челюсти крокодила развивают давление $1 \text{ т} / \text{см}^2$, а древних рептилий до $4 \text{ т} / \text{см}^2$ (10 до 100 кг на зуб).
На зуб не попадаться !**

Факультативно: Датчик внутриглазного давления



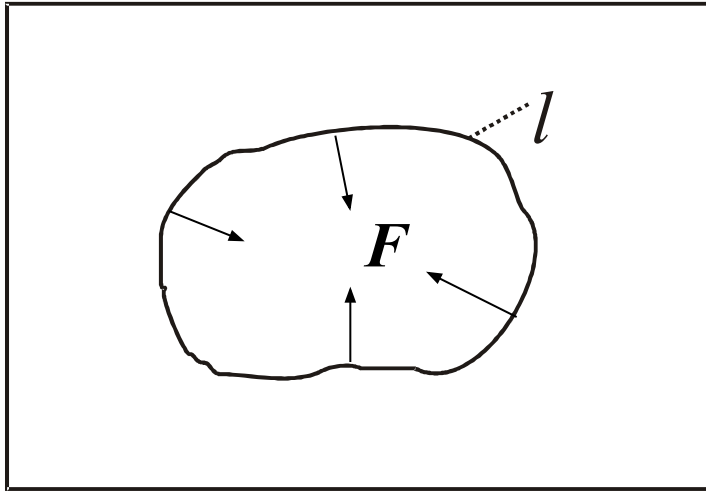
Внутриглазное давление скоро можно будет измерять с помощью современных датчиков, подобных показанному на рисунке. На краешке искусственной линзы разместился крохотный датчик размером 2.5 на 2.6 миллиметра, который измеряет внутриглазное давление.

Если оно повышается, что часто бывает при таком довольно распространенном заболевании, как глаукома, то глазной нерв может атрофироваться, что может приводить к потере зрения и даже слепоте.

Факультативно: Датчик внутриглазного давления

У такого датчика два электрода, верхний - гибкий, а нижний жесткий. Когда внутриглазное давление увеличивается, электроды сближаются, **изменяется емкость устройства**. Затем с помощью крошечной встроенной антенны на приемное устройство, расположенное вне глаза, передается электрический сигнал. Такой приемник может быть встроен, например, в очки. Разработчики считают, что понадобится два-три года, чтобы изобретение попало к пациентам. Датчик можно использовать для измерения внутричерепного и артериального давления, а также в других областях, например, для исследования прочности авиационных конструкций.

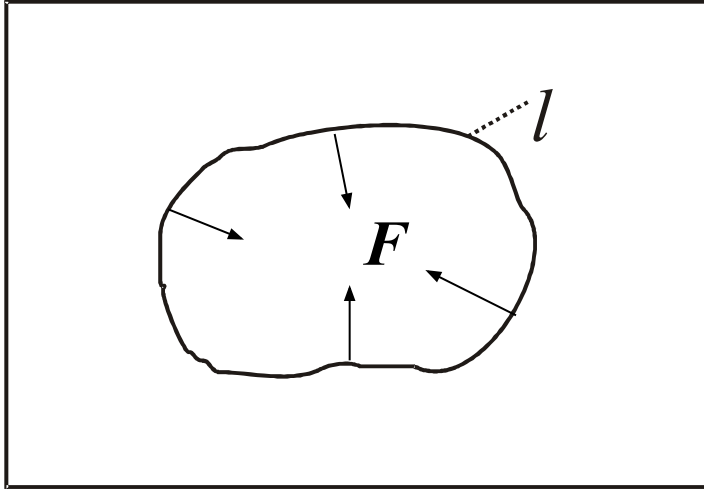
Поверхностное натяжение



Стремление жидкости к сокращению своей поверхности можно описать и количественно с помощью **сил поверхностного натяжения и коэффициента поверхностного натяжения.**

Выделим мысленно произвольный плоский участок поверхности жидкости, ограниченный замкнутым контуром длины l . Так как жидкость стремится сократить свою поверхность, то вдоль всей длины контура l выделенный участок действует на остальную часть поверхности с силой, направленной **по касательной к поверхности (в нашем случае в плоскости) и перпендикулярной к контуру** на каждом элементе этого контура.

Коэффициент поверхностного натяжения



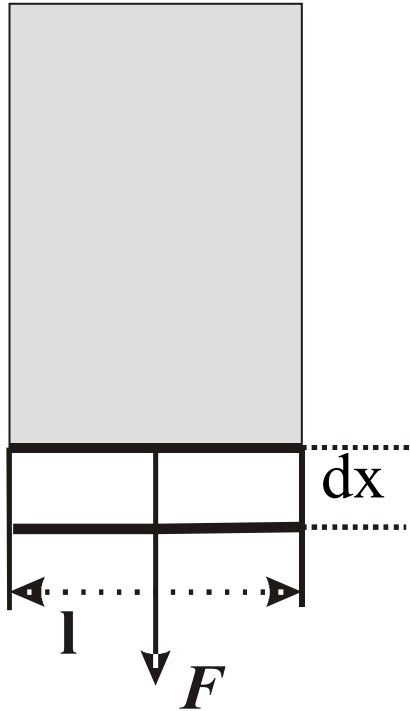
Обозначим величину общей для всего контура силы буквой F . Сила, действующая на единицу длины контура l , называется **коэффициентом поверхностного натяжения и по модулю равна:**

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

В системе единиц СИ σ можно измерять либо в Ньютонах на метр (Н/м), либо как увидим далее также в Джоулях на квадратный метр (Дж/м²).

Коэффициент поверхностного натяжения

Рассмотрим рамку с невесомой подвижной перемычкой затянутую жидкой пленкой. Пленка имеет две поверхности (ту которую мы видим сверху и снизу под пленкой которая нам не видна). Чтобы перемычка не перемещалась, к ней надо приложить внешнюю силу $F = 2l\sigma$, уравнивающую силу поверхностного натяжения 2-х поверхностей (в направлении \perp действию силы). Увеличив внешнюю силу, сместим перемычку на расстояние dx . При этом совершим работу:



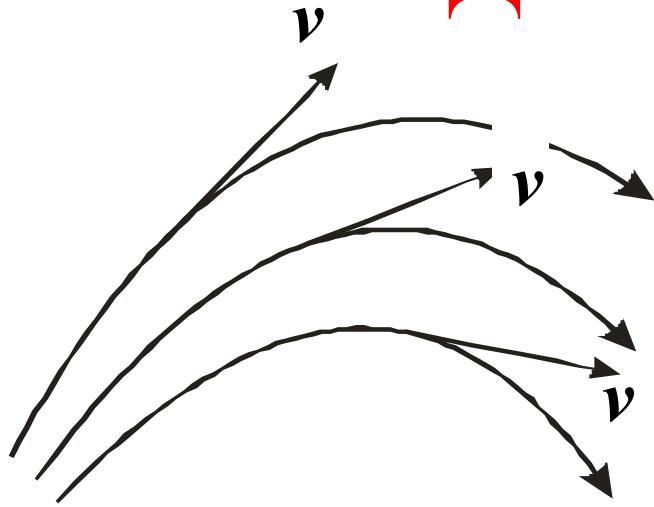
$$dA = F dx = 2l\sigma dx = \sigma dS$$

где dS – суммарное приращение площади поверхности пленки (сверху и снизу). Работа пойдет на увеличение потенциальной энергии жидкости в пленке. **Коэффициент поверхностного натяжения численно равен работе**, которую надо совершить, чтобы увеличить площадь поверхности на единицу $\sigma = dA/dS$

Факультативно: А сила натяжения сильная?

Используя силу поверхностного натяжения у капли воды, физики разработали новый метод для создания крошечных фигурок – сфер, тетраэдров и пирамид - из кусочка резины. Жозе Бико вместе с коллегами использовали силу поверхностного натяжения, чтобы собирать, направлять и разрушать объемные объекты. Они вырезали плоские фигурки миллиметрового размера из тонкой эластичной мембраны от 40 до 80 микрон толщиной. Затем капали на фигурку каплю воды достаточно большую, чтобы она касалась всех углов вырезанной фигуры. По мере испарения капли, ее поверхностное натяжение стягивало мембрану вокруг уменьшающегося объема капли, пока она полностью не оказывалась внутри созданной объемной фигуры

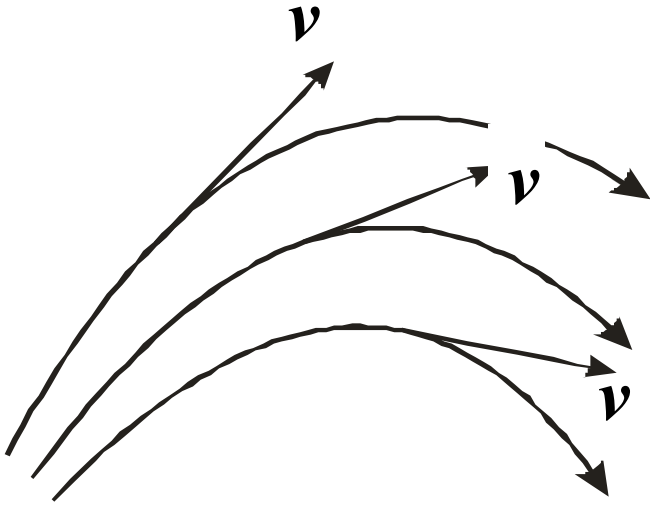
Динамика жидкости



При изучение и описание движения жидкостей возможно два подхода. Первый- следить за отдельной частицами например красителя. Второй- следить не **за движением частиц самой жидкости, а за точками**

пространства (например, размещая датчики в данных точках) и исследуя в каждой точке скорость $v(t)$, с которой через эту точку проходят частицы жидкости. Такой подход к изучению динамики жидкости называется **методом Эйлера**. Совокупность векторов $v(t)$ для всех точек пространства называется **полем вектора скорости**. Для лучшего визуального представления его изображают с помощью **линий тока**, которые проводят таким образом, чтобы **вектор v** в каждой точке был направлен **по касательной** к соответствующей линии.

Динамика жидкости



Плотность линий (как и в случае представления электрического и магнитного поля) **делают пропорциональной модулю** скорости в данном месте. Если скорость в каждой точке пространства остается постоянной,

то течение жидкости называется **стационарным**. При этом линии тока совпадают с траекториями частиц. **Трубкой тока** называют поверхность, образованную линиями тока, проведенными через все точки малого замкнутого контура. Частицы жидкости в процессе течения **не пересекают стенок трубки тока**. Т.е. в идеале если течение имеет сложный характер таких трубок может быть бесконечно много. Мы говорим о идеальном ламинарном течении. Реально конечно есть граничные эффекты и силы вязкого трения.

Модель несжимаемой жидкости

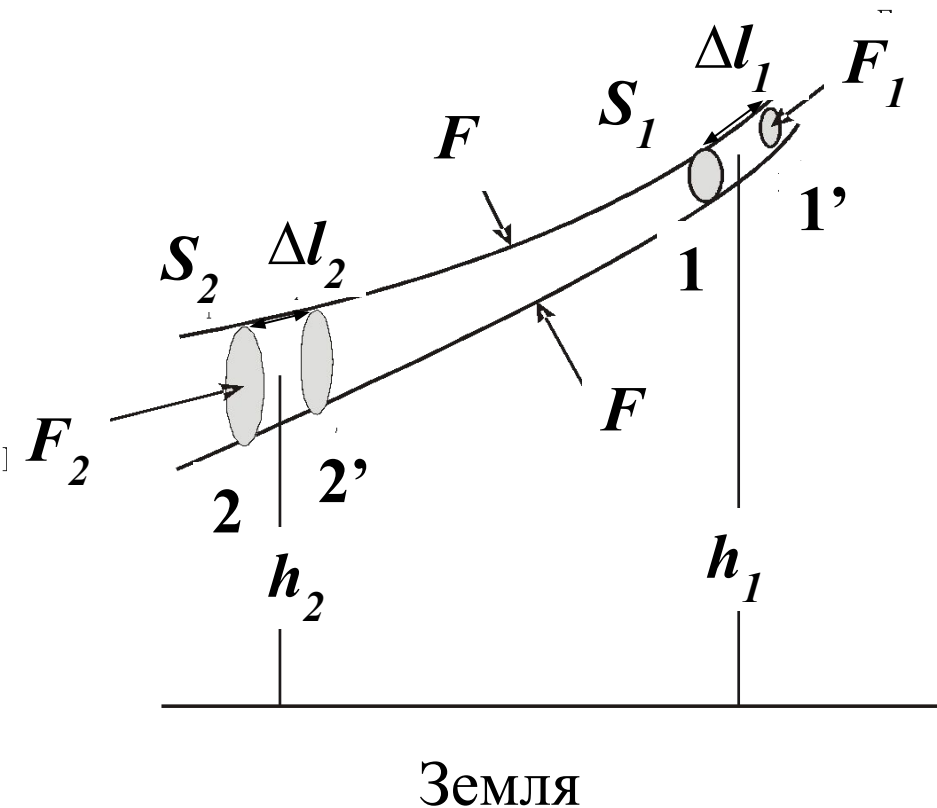
Несжимаемой жидкостью называется однородная жидкость постоянной плотности (плотность постоянна в процессе изучения). Реально через каждое сечение трубки тока за одно и то же время протекают одинаковые объемы идеальной жидкости. Для тонкой трубки тока, когда скорость частиц v в пределах поперечного сечения S постоянна за единицу времени протекает объем $S v$ и можно записать:

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

Это простое заключение, отражающее свойство несжимаемой жидкости при стационарном течении по трубке тока называется **теоремой о неразрывности струи.**

Проще: сколько втекло столько и вытекло!

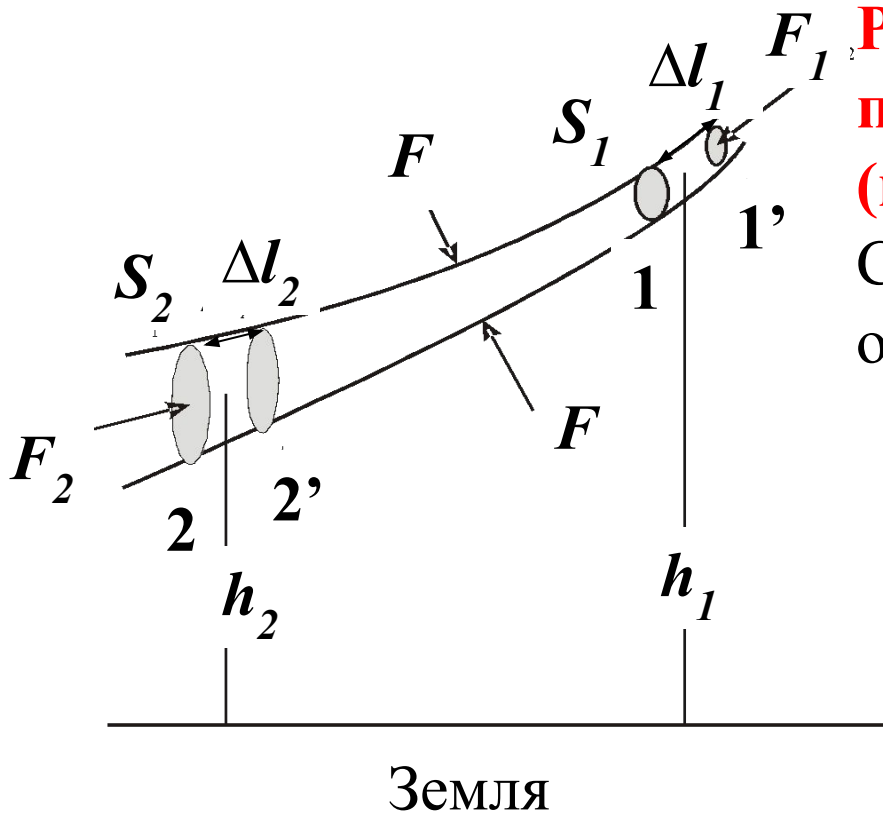
Идеальная несжимаемая жидкость



Для жидкостей существует еще одна упрощающая модель – модель идеальной жидкости. **Идеальной** называют жидкость, у которой **внутреннее трение между слоями полностью отсутствует**. Реально оно конечно есть. Т.е. это такая же абстракция как и абсолютно твердое тело и идеальный газ.

Рассмотрим **стационарное течение идеальной несжимаемой** жидкости в однородном силовом поле притяжения Земли. Пусть за Δt объем жидкости между нормальными сечениями 1' и 2' сместится вниз ($p_1 > p_2$) по трубке тока до сечений 1 и 2 ($\Delta l_1 \neq \Delta l_2$). Была совершена работа! На что израсходована? Какими силами?

Уравнение Бернулли



Работа силы $F_1 - F_2 =$ приращению полной энергии = приращению (кинетической + потенциальной). Сила F работы не совершает так как она \perp к направлению перемещения.

$$A = F_1 \Delta l_1 \cos 0 - F_2 \Delta l_2 \cos 0 = p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2 = (p_1 - p_2) \Delta V$$

пожарный шланг!

Движение **стационарно** и за Δt полная энергия жидкости заключенной между сечениями 1 и 2' (внутренняя часть трубки) не изменяется, поэтому приращение полной энергии ΔE за счет работы равно разности кинетической и потенциальной энергий объемов $\Delta V = S_1 \Delta l_1 = S_2 \Delta l_2$ жидкостей заключенных между сечениями 2-2' и 1-1'

Уравнение Бернулли

$$\Delta E = \left(\frac{1}{2} \rho \Delta V v_2^2 + \rho \Delta V g h_2 \right) - \left(\frac{1}{2} \rho \Delta V v_1^2 + \rho \Delta V g h_1 \right) =$$
$$= (p_1 - p_2) \Delta V$$

где ρ – плотность жидкости, p_1 и p_2 – давление жидкости в сечениях 1 и 2. Сокращаем объем ΔV и после перегруппировки

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h + p = \text{const} \quad \text{уравнение Бернулли}$$

Верно если сечение S малое и нет внутреннего трения

Если $h = \text{const}$? Если $V = \text{const}$? Если $p = \text{const}$?

Опыт с протеканием воды по горизонтальной трубке