

Свойства поверхностного слоя  
жидкости. Смачивание.  
Капеллярные явления

■ ■ ■

**Поверхностный слой жидкости.** Выясним, чем отличаются действия молекулярных сил внутри жидкости и на ее поверхности. Среднее значение равнодействующих молекулярных сил притяжения, приложенных к молекуле  $M_1$ , которая находится внутри жидкости (рис. 45.1), близко к нулю. Случайные флуктуации этой равнодействующей заставляют молекулу  $M_1$  совершать лишь хаотическое движение внутри жидкости. Несколько иначе обстоит дело с молекулами  $M_2$  и  $M_3$ , находящимися в поверхностном слое жидкости.

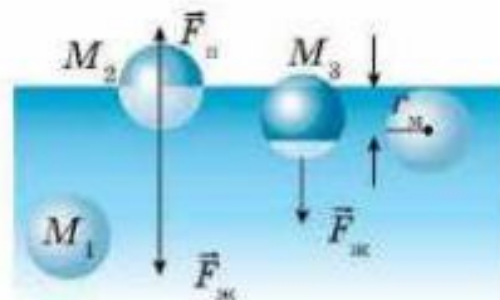


Рис. 45.1

Опишем вокруг молекул *сферы молекулярного действия радиусом  $r_m$*  (порядка  $10^{-9}$  м). Тогда для молекулы  $M_2$  в нижней полусфере окажется много молекул, а в верхней — значительно меньше, так как снизу находится жидкость, а сверху — пар и воздух. Поэтому для молекулы  $M_2$  равнодействующая молекулярных сил притяжения в нижней полусфере  $F_w$  много больше равнодействующей молекулярных сил в верхней полусфере  $F_n$ . Отметим, что сила  $F_n$  так мала, что ею можно пренебречь. Равнодействующая молекулярных сил притяжения, приложенных к молекуле  $M_3$ , меньше, чем для молекулы  $M_2$ , так как определяется только действием молекул в темно-синей области. Существенно, что равнодействующие для молекул  $M_2$  и  $M_3$  направлены внутрь жидкости перпендикулярно ее поверхности.

Таким образом, все молекулы жидкости, находящиеся в поверхностном слое, толщиной, равной радиусу молекулярного действия (рис. 45.1), втягиваются внутрь жидкости. Но пространство внутри жидкости занято другими молекулами, поэтому поверхностный слой создает давление на жидкость, которое называют *молекулярным давлением*.

Теоретические расчеты показали, что молекулярное давление очень велико. Например, для воды оно порядка  $11 \cdot 10^8$  Па, для эфира —  $1,4 \cdot 10^8$  Па.

**Поверхностное натяжение.** Поскольку молекулы жидкости, находящиеся в ее поверхностном слое, втягиваются внутрь жидкости, их потенциальная энергия больше, чем у молекул внутри жидкости. К этому выводу можно также прийти, если вспомнить, что потенциальная энергия взаимодействия молекул отрицательна, и учесть, что молекулы в поверхностном слое жидкости взаимодействуют с меньшим числом молекул, чем молекулы внутри жидкости.

Эту дополнительную потенциальную энергию молекул поверхностного слоя жидкости называют *поверхностной энергией*. За счет нее может быть произведена работа, связанная с изменениями свободной поверхности жидкости. Наоборот, для того, чтобы вывести молекулы, находящиеся внутри жидкости, на ее поверхность, нужно преодолеть противодействие молекулярных сил. То есть произвести работу, которая нужна для увеличения поверхностной энергии  $\Delta E$  прямо пропорционально изменению площади свободной поверхности жидкости  $\Delta S$ :

$$\Delta W = \sigma \Delta S. \quad (45.1)$$

Так как  $\Delta W = A$ , то имеем

$$A = \sigma \Delta S. \quad (45.2)$$

Итак, работа молекулярных сил  $A$  при уменьшении площади свободной поверхности прямо пропорциональна  $\Delta S$ . Но эта работа должна еще зависеть от рода жидкости и внешних условий, например, от температуры. Эту зависимость и выражает коэффициент  $\sigma$ .

*Величина  $\sigma$ , характеризующая зависимость работы молекулярных сил при изменении площади свободной поверхности жидкости от рода жидкости и внешних условий, называется коэффициентом поверхностного натяжения жидкости (или просто поверхностным натяжением). Он показывает, какую работу должны совершить молекулярные силы, чтобы уменьшить площадь свободной поверхности жидкости на единицу:*

$$\sigma = \frac{A}{\Delta S}. \quad (45.3)$$

Выведем единицу измерения поверхностного натяжения  $\sigma$  в СИ:

$$\sigma = 1 \text{ Дж}/1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Н}/\text{м}.$$

Так как всякая система самопроизвольно переходит в состояние, при котором ее потенциальная энергия минимальна, то жидкость должна самопроизвольно переходить в такое состояние, при котором площадь ее свободной поверхности имеет наименьшее значение. Это можно показать с помощью следующего опыта.

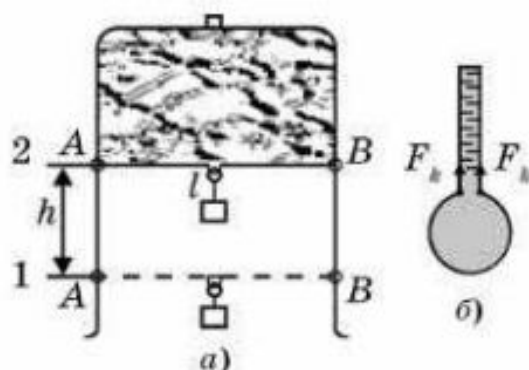


Рис. 45.2

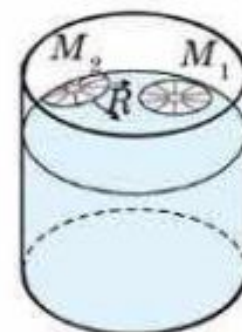


Рис. 45.3

На проволоке, изогнутой в виде буквы П, укрепляют подвижную перемычку  $AB$  (рис. 45.2,  $a$ ). Полученную таким образом рамку затягивают мыльной пленкой, опуская рамку в мыльный раствор. После вынимания рамки из раствора перемычка  $AB$  перемещается вверх, т. е. молекулярные силы действительно уменьшают площадь свободной поверхности жидкости. Поскольку при одном и том же объеме наименьшая площадь поверхности имеется у шара, жидкость в состоянии невесомости принимает его форму. По этой же причине маленькие капли жидкости имеют шарообразную форму (рис. 45.2,  $б$ ).



**Сила поверхностного натяжения.** Молекула  $M_1$ , которая расположена на поверхности жидкости (рис. 45.3), взаимодействует не только с молекулами, находящимися внутри жидкости, но и с молекулами на поверхности жидкости, расположенными в пределах сферы молекулярного действия. Для молекулы  $M_1$  равнодействующая  $R$  молекулярных сил, направленных вдоль поверхности жидкости, равна нулю, а для молекулы  $M_2$ , расположенной у края поверхности, сила  $R$  отлична от нуля. Из рисунка 45.3 видно, что сила  $R$  направлена по нормали — к границе свободной поверхности и по касательной — к самой поверхности.

Молекулярные силы, направленные вдоль поверхности жидкости, действуют на любую замкнутую линию на свободной поверхности жидкости по нормали к этой линии таким образом, что стремятся сократить площадь поверхности жидкости, ограниченную замкнутой линией. Это можно показать на следующем опыте.

## Опыт

На проволочном кольце укрепляется нитка длиной  $l$  (рис. 45.4, а). Если затянуть кольцо мыльной пленкой, то нитка свободно расположится на этой пленке, так как молекулярные силы будут стремиться сократить площадь поверхности, ограниченную как верхним замкнутым контуром, так и нижним. Порвем мыльную пленку с нижней стороны нитки. Тогда молекулярные силы сократят поверхность, ограниченную верхним контуром, и натянут нитку (рис. 45.4, б).

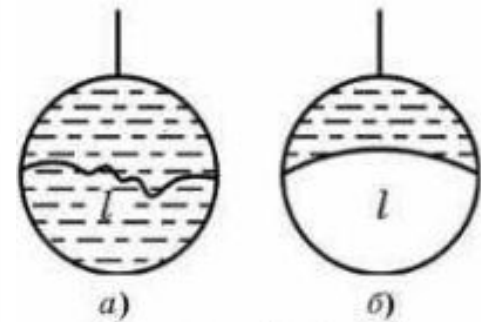


Рис. 45.4

*Сила  $F_{\sigma}$ , обусловленная взаимодействием молекул жидкости, вызывающая сокращение площади ее свободной поверхности и направленная по касательной к этой поверхности, называется силой поверхностного натяжения.*



Покажем, что сила поверхностного натяжения  $F_{\text{н}}$ , действующая на перемычку (рис. 45.2, а), пропорциональна ее длине  $l$ . Работа, совершаемая силами поверхностного натяжения при перемещении поперечины  $l$  из положения 1 в положение 2, выражается формулой  $A = \sigma \Delta S$ . При этом суммарное сокращение площади  $\Delta S$  свободной поверхности жидкости равно  $2hl$ , а так как свободных поверхностей две, то  $A = 2\sigma hl$ .

С другой стороны, работу  $A$  можно найти, умножив силу на путь. Поскольку в нашем примере у поверхности пленки две линии соприкосновения с перемычкой (рис. 45.2, б), то общая сила равна  $2F_{\text{н}}$  и  $A = 2F_{\text{н}} h$ . Таким образом,  $2F_{\text{н}} h = 2 \cdot \sigma hl$ , или

$$F_{\text{н}} = \sigma l. \quad (45.4)$$

Теперь

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}. \quad (45.5)$$

Отсюда следует, что *коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  определяется силой поверхностного натяжения, действующей на единицу длины границы свободной поверхности жидкости.*

Следует помнить, что  $1 \text{ Дж/м}^2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м/м}^2 = 1 \text{ Н/м}$ .

■ ■ ■

Теперь легко понять, почему жидкость принимает форму, при которой площадь ее свободной поверхности оказывается наименьшей: силы молекулярного давления втягивают молекулы с поверхности внутрь жидкости, а силы поверхностного натяжения сокращают площадь свободной поверхности, т. е. закрывают образовавшиеся “окна” на этой поверхности.

Итак, поверхностный слой жидкости всегда находится в состоянии натяжения. Однако это состояние нельзя сравнивать с натяжением упругой растянутой пленки. Упругие силы возрастают по мере увеличения площади растянутой пленки, а силы поверхностного натяжения от площади поверхности не зависят. Сила  $F_{\text{н}}$  в положениях 1 и 2 на рисунке 45.4 одинакова, поскольку число молекул в единице площади свободной поверхности жидкости остается одинаковым.



**Смачивание. Краевой угол.** Если опустить стеклянную палочку в ртуть и затем вынуть ее, то ртути на ней не окажется. Но если эту же палочку опустить в воду, а затем вытащить, на ее конце остается капля воды. Этот опыт показывает, что молекулы ртути притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам стекла, а молекулы воды притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам стекла.

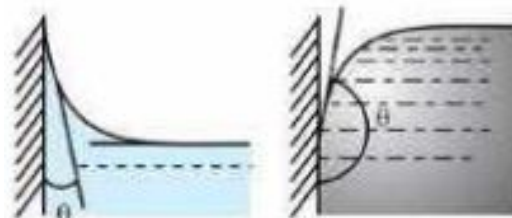
Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого вещества, то жидкость называют *смачивающей это вещество*. Например, вода смачивает чистое стекло и не смачивает парафин. Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого вещества, то жидкость называют *не смачивающей это вещество*. Ртуть не смачивает стекло, однако она смачивает чистые медь и цинк.

Расположим горизонтально плоскую пластинку из какого-либо твердого вещества и капнем на нее исследуемую жидкость. Тогда капля расположится либо так, как показано на рис. 46.1, а, либо так, как показано на рис. 46.1, б. В первом случае жидкость смачивает твердое вещество, а во втором — нет. Отмеченный на рис. 46.1 угол  $\theta$  называют *краевым углом*. Он образуется плоской поверхностью твердого тела и плоскостью, касательной к свободной поверхности жидкости, проходящей через точку А (рис. 46.1), где граничат твердое тело, жидкость



Рис. 46.1

и газ. Внутри краевого угла всегда находится жидкость. Для смачивающих жидкостей краевой угол острый, а для несмачивающих — тупой. Чтобы действие силы тяжести не искажало краевой угол, каплю надо брать как можно меньше.



Поскольку краевой угол  $\theta$  сохраняется при вертикальном положении твердой поверхности, то смачивающая жидкость у краев сосуда, в который она налита, приподнимается (рис. 46.2, а), а несмачивающая — опускается (рис. 46.2, б).

Давление, создаваемое искривленной поверхностью жидкости. Искривление поверхности жидкости у краев сосуда легко обнаружить на опыте. Особенно отчетливо это видно в узких трубках, где искривляется вся свободная поверхность жидкости. В трубке с круглым сечением эта поверхность представляет собой часть поверхности сферы и называется *мениском* (от греч. *менискос* — “лунный серп”). У смачивающей жидкости мениск вогнутый, а у несмачивающей — выпуклый (рис. 46.3, а, б).

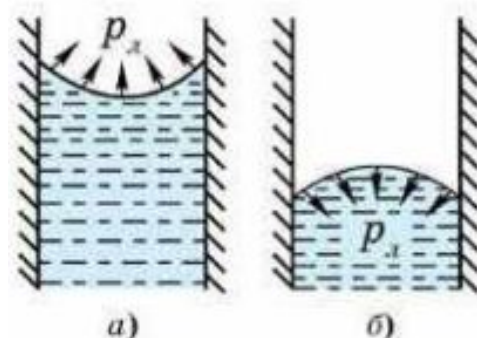


Рис. 46.3

Так как площадь поверхности мениска больше, чем площадь внутреннего сечения трубки, то под действием молекулярных сил искривленная поверхность жидкости стремится выпрямиться и этим создает дополнительное давление  $p_{\text{л}}$ , которое при смачивании (вогнутый мениск) направлено от жидкости, а при несмачивании (выпуклый мениск) — внутрь жидкости. Это давление определил французский ученый (астроном, математик и физик) Пьер Лаплас (1749—1827), поэтому его часто называют *лапласовым давлением*.

Для сферической формы свободной поверхности жидкости с радиусом  $R$  это давление выражается формулой:

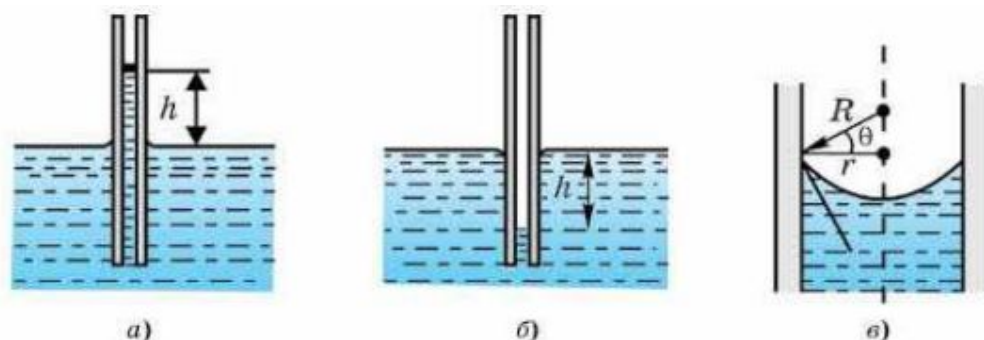
$$p_{\text{л}} = \frac{2\sigma}{R}. \quad (46.1)$$

■ ■ ■

**Капиллярные явления.** Искривление поверхности жидкости в узких трубках приводит к кажущемуся нарушению закона сообщающихся сосудов. Если опустить в воду узкую стеклянную трубку (рис. 46.4, *a*), то вода втягивается в трубку, и ее уровень устанавливается на высоте  $h$  над уровнем воды вне трубки. Объясняется это тем, что лапласово давление  $p_s$  в трубке направлено вверх. Оно и втягивает воду вверх до тех пор, пока не окажется уравновешенным гидростатическим давлением  $p_r$  столба воды в трубке высотой  $h$ , равным  $p_r = \rho gh$ . Поскольку  $p_s = \frac{2\sigma}{R}$ , то при  $p_s = p$  имеем  $\frac{2\sigma}{R} = \rho gh$ , откуда

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}. \quad (46.2)$$

При полном смачивании ( $\theta = 0$ ) мениск в узкой трубке имеет форму полусферы, и радиус сферической поверхности  $R$  равен внутреннему радиусу трубки  $r$ . Тогда  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ . (46.3)



При неполном смачивании ( $\theta \neq 0$ ) радиус мениска  $R = \frac{r}{\cos \theta}$  (рис. 46.4, в) и

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho g r}. \quad (46.4)$$

Из (рис. 46.4, а, б) видно, что высота  $h$  тем больше, чем меньше внутренний радиус трубки  $r$ . Подъем воды особенно значителен в трубках, внутренний диаметр которых соизмерим с диаметром волоса (или еще меньше); поэтому такие трубки называют *капиллярами* (от греч. *капиллярис* — “волосной, тонкий”). Смачивающая жидкость в капиллярах поднимается вверх (рис. 46.4, а), а несмачивающая — опускается вниз (рис. 46.4, б). Явления, обусловленные втягиванием смачивающих жидкостей в капилляры или выталкиванием несмачивающих жидкостей из капилляров, называются *капиллярными явлениями*.

Капиллярные явления играют большую роль в природе и технике. Множество мельчайших капилляров имеется в растениях. По ним влага из почвы поднимается до вершин деревьев и через листья испаряется в атмосферу. В почве имеются капилляры, и чем они уже, тем плотнее почва. Вода по этим капиллярам поднимается до поверхности и быстро испаряется, а земля становится сухой. Ранняя весенняя вспашка земли разрушает капилляры, т. е. сохраняет подпочвенную влагу.

В технике также необходимо учитывать капиллярные явления.



## Домашнее задание:

Записать краткий конспект

Решить задачи

Ответить на вопросы (устно)

### Решайте

1. На какую высоту  $h$  поднимается вода между параллельными пластинами, находящимися на расстоянии  $d = 0,2$  мм друг от друга? Коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma = 73$  мН/м.

(Ответ: 7,3 см)



### Вопросы для самоконтроля

1. Какие процессы происходят в поверхностном слое жидкости?
  2. Что такое *свободная энергия*?
  3. Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения?
  4. Что называется *силой поверхностного натяжения*? Какова ее единица измерения?
- 
1. Каков механизм смачивания или несмачивания жидкостью твердого тела?
  2. Что называется *лапласовым давлением*? Как оно направлено?
  3. Как объяснить капиллярные явления?
  4. Какие примеры капиллярных явлений вам известны?
  5. Каковы преимущества осенней и весенней вспашки?
  6. Почему считается, что вода — синоним жизни?