

Ножко Е.С.

**Поверхностное натяжение: способы измерения
(В дополнение к теме «Сорбция»)**

<https://skysmart.ru/articles/physics/poverhnostnoe-natyazhenie>

1. Краткие теоретические основы

Поверхностное натяжение (σ) — термодинамическая характеристика поверхности раздела двух находящихся в равновесии фаз, определяемая работой обратимого изотермокинетического образования единицы площади этой поверхности раздела при условии, что температура, объём системы и химические потенциалы всех компонентов в обеих фазах остаются постоянными.

Поверхностное натяжение имеет двойной физический смысл — энергетический (термодинамический) и силовой (механический).
Энергетическое (термодинамическое) определение: поверхностное натяжение — это удельная работа увеличения поверхности при её растяжении при условии постоянства температуры.

Силовое (механическое) определение: поверхностное натяжение — это сила, действующая на единицу длины линии, которая ограничивает поверхность жидкости.

Сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности жидкости, перпендикулярно к участку контура, на который она действует, и пропорциональна длине этого участка.

Коэффициент пропорциональности (σ) — коэффициент поверхностного натяжения. Это

- сила, приходящаяся на единицу длины контура, $\sigma = F/L$, Н/м.
- энергия, затрачиваемая на разрыв единицы поверхности, $E = \sigma S$, Дж/м².

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от природы жидкости, температуры и наличия примесей. При увеличении температуры он уменьшается. При критической температуре, когда исчезает различие между жидкостью и паром, $\sigma = 0$.

Так как **свободная энергия изолированной системы стремится к минимуму**, то жидкость (в отсутствие внешних полей) стремится принять форму, имеющую минимальную площадь поверхности: свободная капля стремится принять форму шара. Следствием этого являются следующие явления:

- в невесомости порция жидкости принимает сферическую форму (сфера имеет наименьшую площадь поверхности среди всех тел одинакового объёма). То же самое происходит с каплей жидкости, помещаемой внутрь другой, несмешивающейся жидкости с первой жидкостью той же плотности (опыт Плато),
- ламинарная струя воды образует цилиндр, который затем разбивается на шаровидные капли из-за неустойчивости Рэлея — Плато,
- небольшие предметы со средней плотностью, которая однако больше плотности жидкости, способны «плавать» на поверхности жидкости, так как их вес оказывается уравновешенным силой поверхностного натяжения,
- некоторые насекомые (например, водомерки) способны передвигаться по воде, удерживаясь на её поверхности за счёт сил поверхностного натяжения (См. фото),
- на многих поверхностях, именуемых несмачиваемыми (гидрофобными), вода (или другая жидкость) собирается в капли.



Фото 1 - Клоп-водомерка умело использует силу поверхностного натяжения, удерживающую его на поверхности воды. Он не тонет, поскольку вес клопа меньше силы поверхностного натяжения.

2. Экспериментальные методы определения поверхностного натяжения

Существующие методы определения поверхностного натяжения делятся на статические и динамические. **Статическими методами** определяется поверхностное натяжение практически неподвижных поверхностей, образованных задолго до начала измерений и поэтому находящихся в равновесии с объемом жидкости. метод капиллярного поднятия. **Динамические методы** основаны на том, что некоторые виды механических воздействий на жидкость сопровождаются периодическими

растяжениями и сжатиями ее поверхности, на которые влияет поверхностное натяжение.

Методы измерения коэффициента поверхностного натяжения

Статистические	Динамические
Метод поднятия в капилляре Метод Вильгельми Метод лежащей капли Метод определения по форме висячей капли. Метод вращающейся капли	Метод Дю Нуи (метод отрыва кольца). Сталагмометрический, или метод счета капель. Метод максимального давления пузырька. Метод осциллирующей струи Метод стоячих волн

2.1 Метод поднятия в капилляре

При частичном погружении капилляра в смачивающую его жидкость уровень жидкости в нем повышается до тех пор, пока гидростатическое давление столба не уравнивает действие силы, вызывающей втягивание жидкости в капилляр. Эта сила обусловлена искривлением поверхности жидкости вследствие смачивания и возникновением капиллярного давления, которое в данном случае действует в направлении, противоположном внешнему давлению. Искривление поверхности приводит к ее увеличению. При этом уменьшается радиус кривизны (от 0° для плоской поверхности до Θ) и совершается работа против силы поверхностного натяжения.

Связь капиллярного давления P_k с радиусом кривизны R_k и поверхностным натяжением дает уравнение Лапласа

$$P_k = \frac{2\sigma}{R_k}, \quad (1)$$

справедливое для случая, когда мениск является частью полусферы.

В состоянии равновесия гидростатическое давление столба жидкости в капилляре уравнивает капиллярное давление:

$$\frac{2\sigma}{R_k} = (\rho_1 - \rho_2)gh, \quad (2)$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотность жидкости и газа (воздуха) соответственно; g — ускорение силы тяжести; h — высота капиллярного поднятия. Величиной ρ_2 можно пренебречь, тогда поверхностное натяжение можно рассчитать, используя формулу Жюрена:

$$\sigma = \frac{R_k \rho g h}{2}. \quad (3)$$

Таким образом, определение поверхностного натяжения сводится к измерению высоты капиллярного поднятия, что можно сделать с большой точностью с помощью катетометра. Величину же радиуса кривизны R_k жидкого мениска измерить практически невозможно. Поэтому пользуются радиусом капилляра r , который связан с R_k соотношением

$$r = R_k \cos\theta, \quad (4)$$

где θ — угол смачивания (Рис. 1).

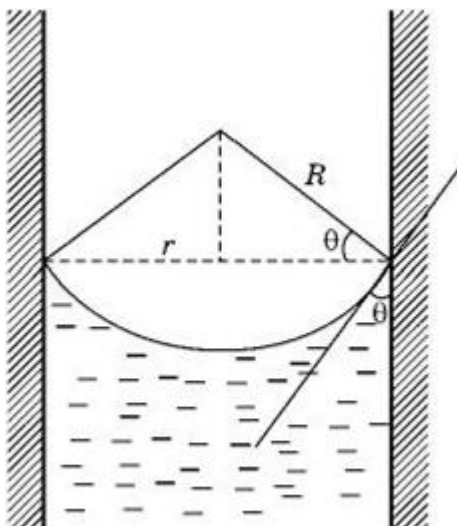


Рис. 1 - Мениск жидкости в капилляре

Метод капиллярного поднятия относится к числу наиболее точных ввиду простоты теории и возможности точного определения экспериментальных

величин. При соблюдении необходимых предосторожностей величина поверхностного натяжения может быть определена с точностью до 0,01 мН/м.

Для практического определения величины поверхностного натяжения нет необходимости знать радиус капилляра. Достаточно сравнить высоту поднятия исследуемой жидкости с высотой поднятия воды и воспользоваться формулой:

$$\sigma_x = \frac{h_r \times \rho_x}{h(H_2O) \times \rho(H_2O)} \times \sigma(H_2O) \quad (5)$$

2.2 Метод лежащей капли

В методе лежащей капли (Рис.2) жидкость с известным поверхностным натяжением помещается на твердую поверхность с помощью шприца. Диаметр капли должен быть от 2 до 5 мм; это гарантирует, что краевой угол не будет зависеть от диаметра. В случае очень малых капелек будет велико влияние поверхностного натяжения самой жидкости (будут формироваться сферические капли), а в случае больших капель начинают доминировать силы гравитации.

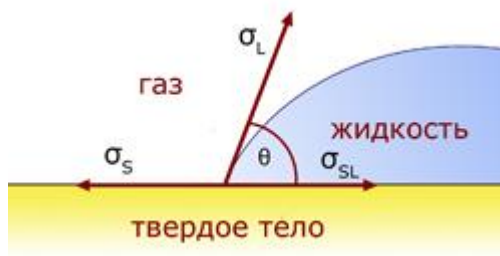


Рис. 2 - Метод лежащей капли

В методе лежащей капли (Рис. 3) измеряется угол между твердой поверхностью и жидкостью в точке контакта трех фаз. Соотношение сил межфазного и поверхностного натяжения в точке контакта трех фаз может описываться уравнением Юнга, на базе которого можно определить краевой угол:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L}$$

(6)

Для определения поверхностного натяжения каплю фотографируют и на снимке определяют значения r и h . Затем, используя таблицы Башфорта и Адамса, определяют величину $\sigma_{ЖГ}$ из соотношения:

$$\frac{\sigma_{жг}}{\Delta\rho \cdot g} = a^2 = f\left(\frac{H}{r}\right) \cdot r^2 \quad (7), \text{ где}$$

a^2 – капиллярная постоянная,

$\Delta\rho$ – разность плотностей контактирующих жидкой и газообразной

r – максимальный радиус капли;

h – высота капли над экватором;

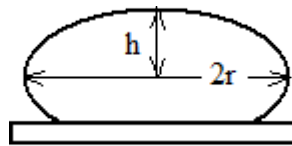


Рис. 3 – Капля на твердой плоской поверхности

2.3 Метод отрыва кольца Дью Нуи

Это классический метод для определения поверхностного/межфазного натяжения, который основан на измерении максимального усилия (F) для отрыва кольца с известной геометрией (длиной смачивания, L), сделанного из хорошо смачиваемого материала (угол смачивания = 0°). При подъеме кольца жидкость стремится стечь с него, что приводит к постепенному утончению плёнки жидкости и отрыву кольца.

Сила межфазного натяжения рассчитывается на основе разницы между максимальным усилием (F_{\max}), приложенным для отрыва кольца, и силой гидростатического столба жидкости под кольцом (F_v). Данные для последней величины могут быть взяты из специальных таблиц (Харкинса-Джордана) или рассчитаны на основе разности плотностей фаз, геометрических данных кольца и высоты поднятия тонкого слоя жидкости. Краевой угол между жидкостью и стандартным кольцом равен нулю для большинства общеизвестных жидкостей (за исключением ртути).

$$\sigma = \frac{F_{\max} - F_v}{L \cdot \cos\theta}$$

(8)

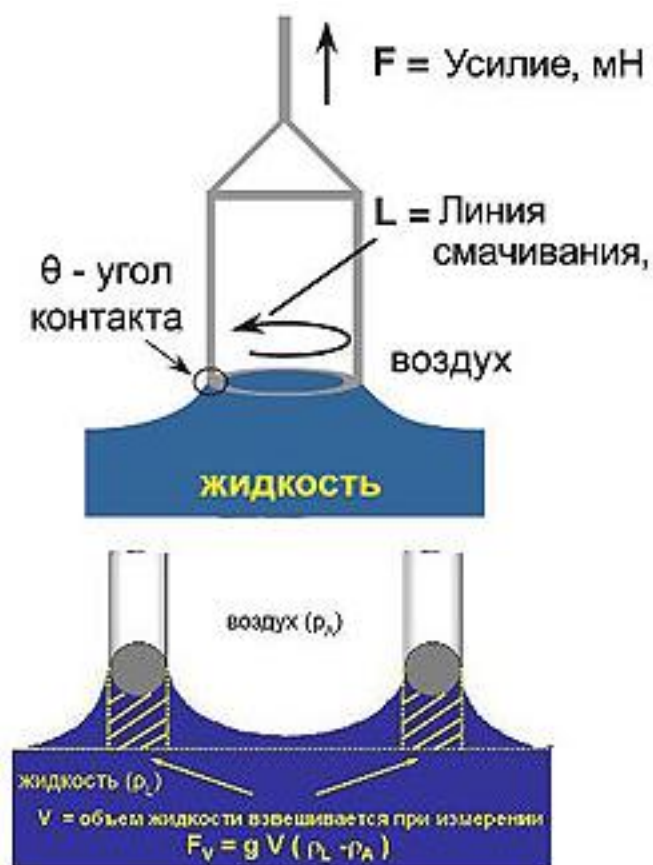


Рис. 4 - Метод отрыва кольца Дью Нуи

Основной недостаток метода кольца дью Нуи - необходимость вводить поправки на прикладываемую силу из-за дополнительного веса жидкости под кольцом. Вес жидкости под кольцом необходимо вычесть из максимально измеренной силы, чтобы получить истинную силу, прикладываемую к кольцу для его отрыва от поверхности. Кроме веса жидкости под кольцом необходимо учитывать, разницу внешнего и внутреннего диаметра кольца. Максимальная нагрузка, при которой угол смачивания равен 0° , достигается по-разному для внутренней и внешней стороны кольца.

2.4 Метод пластины Вильгельми

В методе пластины Вильгельми (Рис. 5) пластина известных размеров взаимодействует с поверхностью жидкости. При этом жидкость смачивает пластину вдоль вертикального контура. Стандартная пластина остается своим нижним краем на нулевом уровне (на уровне поверхности жидкости) на протяжении всего измерения. В этом случае нет необходимости вводить поправку на силу веса жидкости под пластиной, как в методе кольца.

!!! Дополнительным преимуществом метода пластины является то, что не надо знать плотности жидкости, а также то, что не происходит перемешивания фаз (пластина только касается жидкости).

Несмотря на все эти преимущества, метод кольца дает более точные результаты (выше прикладываемые силы), кроме того имеется много справочных данных для разных жидкостей.

Поверхностное натяжение рассчитывается на основании измеряемой силы (F), длины смачиваемой поверхности (L) и краевого угла смачивания (θ). Стандартные пластины выполняются из материалов, которые очень хорошо смачиваются, т.е. $\theta = 0^\circ$. Упрощенная формула:

$$\sigma = F_{\max}/2L \quad (9)$$

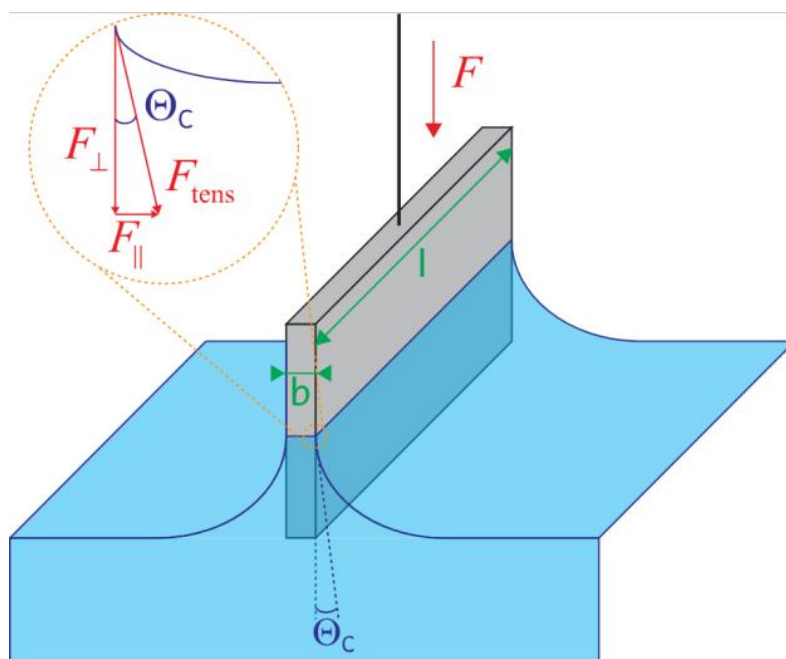


Рис. 5 - Метод пластины Вильгельми

2.5 Метод вращающейся капли (оптический метод)

Для очень малого межфазного натяжения методы кольца и пластины не подходят, т.к. силы взаимодействия очень малы, а сама поверхность очень нестабильна. Поэтому межфазную поверхность разрушают до такой степени, чтобы можно было легко определить результирующие силы. Для метода вращающейся капли против сил поверхностного натяжения используют центробежные силы.

Капля легкой фазы (обычно, масло) вводится с помощью капилляра в толщу тяжелой фазы (Рис. 6). Капилляр вращается вдоль своей оси с определенной частотой. При частоте 0 Гц капля будет иметь форму шара. При увеличении частоты молекулы межфазного слоя будут подвергаться воздействию центробежных сил, направленных перпендикулярно оси вращения капилляра. Силы межфазного натяжения равны (но точки

приложения отличаются) центробежной силе, а молекулы в межфазном слое двигаются по определенной траектории с радиусом r . Благодаря этому факту капля вытягивается вдоль оси вращения до достижения равновесия.

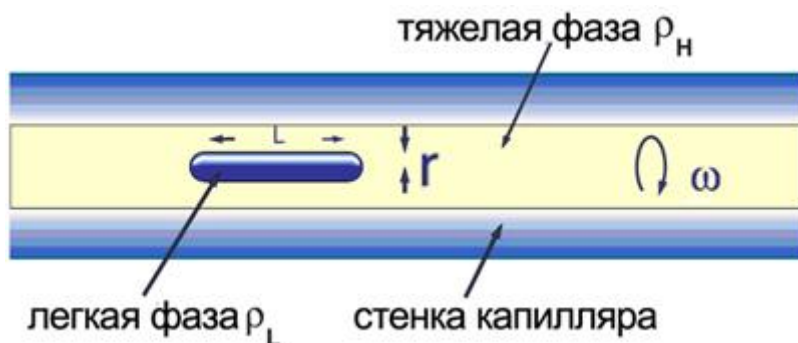


Рис. 6 – Метод вращающейся капли

Зная разницу между плотностью тяжелой фазы (ρ_H) и плотностью легкой фазы (ρ_L), радиус вращения капли (r), частоту вращения (ω) можно определить межфазное натяжение (k - постоянная прибора, зависящая от приближения оптики).

$$\sigma_i = kr^3 \omega^2 (\rho_H - \rho_L) \quad (10)$$

Метод вращающейся капли используется в тензиометре SITE100. Диапазон измерения межфазного натяжения с помощью метода вращающейся капли: $10^{-6} \dots 50/100$ мН/м.

2.6 Метод висячей капли (оптический метод)

Так как поверхностное натяжение стремится минимизировать площадь поверхности жидкости, то геометрия капли в отсутствие гравитации будет идеальной сферой. Если на каплю действуют силы гравитации и что-то фиксирует верх капли, последняя вытягивается вдоль оси действия сил гравитации. Согласно уравнению Лапласа давление, действующее на каплю, зависит от радиуса кривизны контура (Рис.7).

По разнице давлений (ΔP), действующих на кончик капли и другие ее точки, можно рассчитать поверхностное натяжение. Для этой цели фотографируется форма капли, и, с помощью уравнения Лапласа, рассчитывается межфазное натяжение ($r_{1,2}$ - основные радиусы кривизны контура).

$$\sigma = \frac{\Delta P}{1/r_1 - 1/r_2} \quad (11)$$

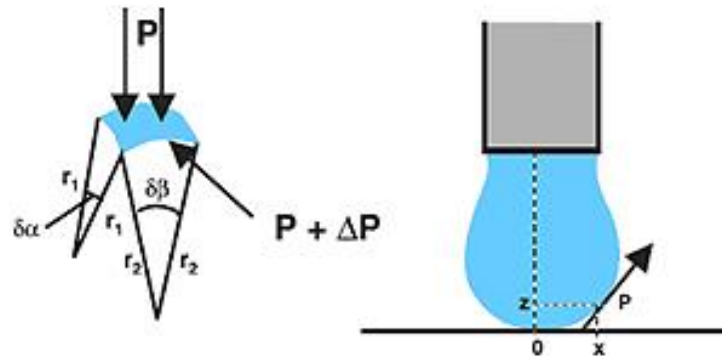


Рис. 7 - Метод висячей капли

2.7 Динамический метод пластины Вильгельми. Метод одиночного волокна или Метод поднятия по капилляру (Метод Вабурна)

Метод поднятия по капилляру - частный случай динамического метода пластины Вильгельми был разработан для характеристики смачиваемости порошков и пучков волокон по степени проникновения жидкости (адсорбции).

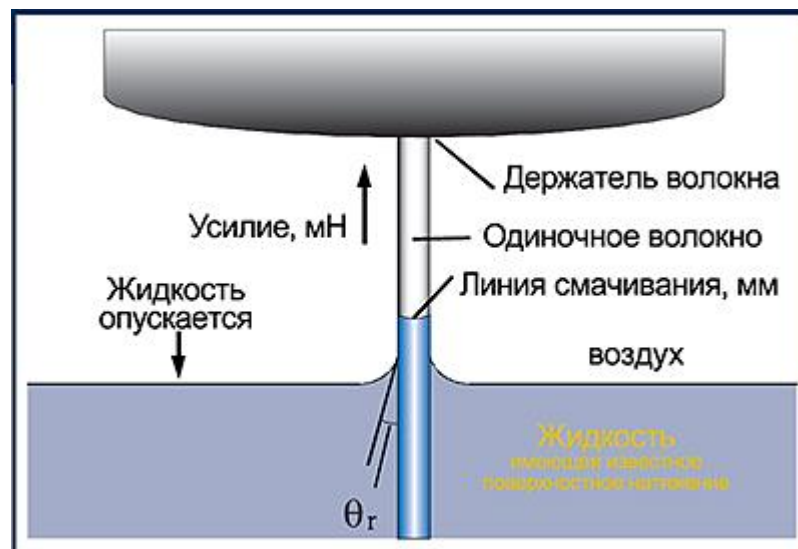


Рис.8 – Метод одиночного волокна

Данный метод позволяет измерять только краевой угол до 90°, т.е. смачиваемые образцы. Кроме того, если волокно представляет собой полый капилляр, то результаты могут быть недостоверны из-за влияния

капиллярных сил. В таких случаях измерение необходимо проводить с помощью метода лежащей капли (и микродозирования).

Метод основан на измерении прироста массы образца во времени (m^2/t). Порошок или волокнистый материал (травы) помещается в стеклянную трубку с фильтром на одном конце (Рис.9). Эта трубка опускается в жидкость (с известным поверхностным натяжением), которая проникает через фильтр и смачивает порошок/волокна.



Рис. 9 - Метод поднятия по капилляру (Метод Вабуерна)

В данном методе высок человеческий фактор при подготовке образца. Разные порошки имеют разную насыпную плотность, чтобы получить достоверные результаты, эксперимент надо провести несколько раз на каждом образце. Кроме того, необходимо определять постоянную (C) капилляров, которая зависит от радиуса (r) микроскопических капилляров между частицами порошка или волокнами и от числа капилляров n_k . Для каждого нового порошка измеряют прирост массы (m^2/t) на хорошо смачивающей жидкости (например, на гексане), для которой $\cos \theta^\circ = 1$.

$$\cos \theta = \frac{m^2}{t} \cdot \frac{\eta}{\rho^2 \cdot \sigma \cdot c} \quad (12)$$

2.8 Метод максимального давления в пузырьке (метод Ребиндера)

При увеличении количества газа, проходящего через капилляр, возраст поверхности снижается, а, следовательно, снижается время, необходимое молекулам для диффузии или адсорбции на межфазной поверхности. Это приводит к неполному покрытию вновь образованной поверхности активными молекулами, в результате поверхностное

натяжение увеличивается. Продолжительное наблюдение за каждым пузырьком (за временем и давлением) позволяет построить кривую зависимости поверхностного натяжения от возраста поверхности.

Согласно уравнению Лапласа давление внутри газового пузырька увеличивается при уменьшении его диаметра. При формировании газового пузырька на кончике капилляра, опущенного в жидкость, форма пузырька меняется в зависимости от приложенного давления.

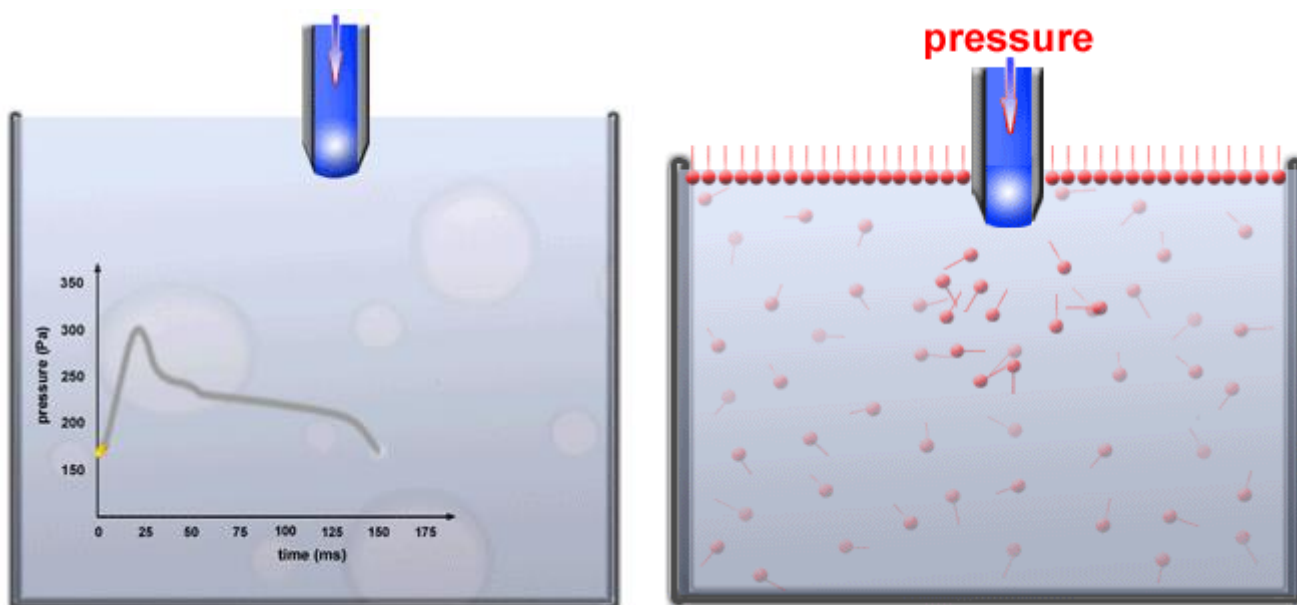


Рис. 10 - Метод максимального давления в пузырьке (метод Ребиндера)

Давление достигает максимума (P_{\max}), когда пузырек принимает форму сферы. Это максимальное давление прямо пропорционально поверхностному натяжению жидкости (P_0 - гидростатическое давление в капилляре за счет погружения, r - радиус сферы = радиус капилляра).

$$\sigma_d = \frac{P_{\max} - P_0}{2} r \quad (13)$$

С помощью метода максимального давления в пузырьке (метод Ребиндера) можно измерять поверхностное натяжение до 100 мН/м.

2.9 Метод счета или взвешивания капель (сталагмометрический)
<https://xumuk.ru/colloidchem/23.html>

https://ru.qaz.wiki/wiki/Stalagmometric_method

Сталагмометрический метод основан на измерении массы капель P , образующихся при вытекании жидкости из вертикальной трубки с радиусом выходного отверстия r . Расчет проводят по формуле

$$\sigma = \frac{P}{2\pi r} f\left(\frac{r}{a}\right), \quad (14)$$

где $f(r/a)$ – некоторая функция, определяемая из таблиц Гаркинса и Брауна; a – капиллярная постоянная.

Если жидкости хорошо смачивают материал капилляра, то, пренебрегая различием между углами смачивания, можно проводить **относительное измерение поверхностного натяжения**, используя стандартную жидкость. В этом случае обычно принимают, что масса капли P в момент отрыва пропорциональна поверхностному натяжению на границе раздела жидкость – пар, т.е.

$$P = ks$$

где k – постоянная данного прибора.

Массу одной капли определяют, подсчитывая число капель (n), вытекающих из сталагмометра объемом V :

$$P = \rho V / n. \quad (15)$$

При калибровке сталагмометра стандартной жидкостью

$$\sigma / \sigma_0 = P / P_0, \quad \text{поэтому}$$

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\rho n_0}{n \rho_0}. \quad (16)$$

Таким образом, зная плотность жидкости и число вытекающих капель, можно найти поверхностное натяжение исследуемой жидкости. Простейший сталагмометра, который представляет собой сферический пузырек B известного объема V_k , ограниченный метками b и d и соединенный с двумя калиброванными капиллярами, имеющими объем каждого деления v_e . Сталагмометр заполняют жидкостью, затем позволяют мениску очень медленно перемещаться по капилляру, перекрывая частично доступ воздуха в капилляр A с помощью резиновой трубки и зажима таким образом, чтобы каждая капля образовывалась за время не менее 4 с. После падения первой капли проводится отсчет деления, соответствующего верхнему мениску a в капилляре A (n делений от метки a). Скорость последующего образование капель также контролируют и устанавливают время образования капли не менее 4–5 с. После достижения мениском метки, например e в нижнем капилляре C (m делений от метки d), определяют объем одной капли при числе подсчитанных вытекших из сталагмометра капель N :

$$V = \frac{V_k + (m_2 + m_1)v_e}{N} \quad (17)$$

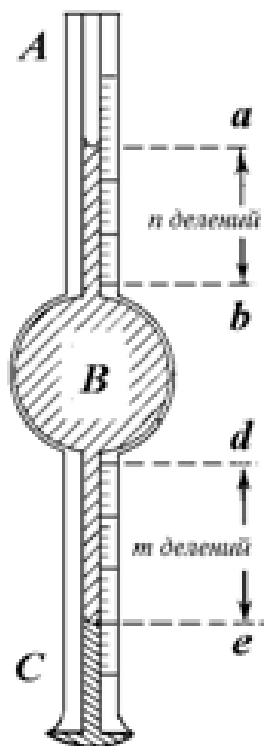


Рис.11 – Схема простейшего сталагмометра

Если использовать относительный метод определения поверхностного натяжения водных растворов ПАВ с использованием в качестве стандартной жидкости воды, то его расчет можно проводить по формуле

$$\sigma = \sigma_0 \frac{V_D}{V_0 A_0} \quad (18)$$

К недостаткам сталагмометрического метода можно отнести возможность испарения жидкости с поверхности капель при их длительном образовании и необходимость введения поправочных коэффициентов для точного определения поверхностного натяжения.

При учете всех поправок погрешность сталагмометрического метода не превышает 1%.

2.9 Методы «стоячей» и «бегущей» волн

При возмущении жидкости пластиной «лежащей» на её поверхности, по ней начинает распространяться цуг волн. Если просветить кювету с жидкостью импульсным источником света с частотой равной частоте возмущения, то на экран спроецируется «стоячая» волновая картина.

Измеряя длину волны на экране и геометрически перерасчитывая её (зная расстояние от источника света до поверхности жидкости и расстояние от поверхности до экрана, а также про подобие треугольников) можно получить величину поверхностного натяжения по формуле:

$$\sigma = \frac{\rho \lambda^2}{4\pi^2} (2\pi\nu^2 \lambda - g) \quad (19), \text{ где}$$

σ — поверхностное натяжение; ρ — плотность жидкости; λ — длина волны; ν — вынуждающая частота; g — ускорение свободного падения

2.10 Метод колеблющейся (осциллирующей) струи

Для определения динамического поверхностного натяжения в быстротекущих процессах используется метод струи. Этот метод основан на образовании стоячих волн на струе жидкости, вытекающей из малого эллиптического отверстия под действием постоянного перепада давления. Форма и размер стоячих волн зависят от поверхностного натяжения исследуемой жидкости и размеров эллиптического отверстия. Для расчета поверхностного натяжения необходимо определить длину волны. Точность измерения поверхностного натяжения в этом методе зависит от размеров эллиптического отверстия; чем меньше отверстие и больше скорость истечения жидкости, тем скорее наступает адсорбционное равновесие на образующейся поверхности раздела фаз. Точность измерения зависит от устройства прибора.

3. Опыты, демонстрирующие наличие поверхностного натяжения

!!! В Ютубе есть видеофрагменты опытов, например,

<https://youtu.be/OWxJI0AC1RY> (Лекция)

<https://youtu.be/w0pp8oS3p58>

<https://youtu.be/oRMdFXe1bW4>

3 Примеры решение задач

Пример 1. С какой силой действует мыльная пленка на проволоку АВ, если длина проволоки $l = 3$ см? На сколько изменится поверхностная энергия пленки при перемещении проволоки на $d = 2$ см? Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 0,04$ Н/м.



Решение:

- 1) Определим силу поверхностного натяжения. У пленки две стороны, поэтому в формуле появляется множитель «2».

$$F = 2\sigma l = 2 \cdot 0,04 \cdot 0,03 = 2,4 \cdot 10^{-3}$$

- 2) Теперь определим изменение поверхностной энергии пленки:

$$\Delta E = 2\sigma S = 2\sigma ld = 2 \cdot 0,04 \cdot 0,03 \cdot 0,02 = 48 \cdot 10^{-6}$$

Ответ: $F = 2,4 \cdot 10^{-3}$ Н, или 2,4мН, $\Delta E = 48 \cdot 10^{-6}$ Дж, или 48 мкДж.

Пример 2. Для определения коэффициента поверхностного натяжения воды была использована пипетка с диаметром выходного отверстия $d = 2$ мм. Оказалось, что $n = 40$ капель имеют массу $m = 1,9$ г. Каким по этим данным получится коэффициент поверхностного натяжения σ ?

Решение:

Сила тяжести, действующая на каплю жидкости, равна m_0g , а противодействует ей сила поверхностного натяжения. Линия контакта капли и пипетки – окружность капли. Ее длина равна $l = \pi d$. Масса капли $m_0 = \frac{m}{n}$.

Тогда:

$$m_0g = F_n$$

$$\frac{m}{n}g = \sigma\pi d$$

Откуда

$$\sigma = \frac{mg}{n\pi d} = \frac{1,9 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{40 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 74 \cdot 10^{-3}$$

Ответ: $\sigma = 74 \cdot 10^{-3}$ мН/м.

Пример 3. Из капельницы накапали равные массы сначала холодной воды при температуре $t_1 = 8^\circ \text{C}$, затем горячей воды при температуре $t_2 = 80^\circ \text{C}$. Как и во сколько раз изменился коэффициент поверхностного натяжения воды, если в первом случае образовалось $n_1 = 40$, а во втором $n_2 = 48$ капель?

Решение:

Аналогично предыдущей задаче, приравняем силу тяжести и силу поверхностного натяжения, и отсюда определим коэффициент поверхностного натяжения.

Сначала сделаем это для холодной воды:

$$\begin{aligned} m_0g &= F_n \\ \frac{m}{n_1}g &= \sigma_1\pi d \end{aligned}$$

Теперь для горячей:

$$\frac{m}{n_2}g = \sigma_2\pi d$$

Откуда

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{mg}{n_1\pi d} \\ \sigma_2 &= \frac{mg}{n_2\pi d} \end{aligned}$$

Тогда

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{48}{40} = 1,2$$

Ответ: в 1,2 раза.

Пример 4. В капиллярной трубке радиусом $R = 0,5$ мм жидкость поднялась на высоту $h = 11$ мм. Оценить плотность данной жидкости, если ее коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 22$ мН/м.

Решение:

По формуле для капилляра

$$\rho = \frac{2\sigma \cos \alpha}{hr g} = \frac{2 \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{11 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8} = 820$$

Ответ: $\rho = 820$ кг/м³.

Пример 5. В дне сосуда со ртутью имеется круглое отверстие диаметром $d = 70$ мкм. При какой максимальной высоте слоя ртути H она еще не будет вытекать через отверстие?

Решение:

Сила давления ртути будет равна силе поверхностного натяжения, тогда жидкость не выльется:

$$\begin{aligned} pS &= F_n \\ \rho ghS &= \sigma l \end{aligned}$$

Откуда

$$h = \frac{\sigma l}{\rho g S} = \frac{\sigma \pi d}{\rho g \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\sigma}{\rho g d} = \frac{4 \cdot 472 \cdot 10^{-3}}{13600 \cdot 9,8 \cdot 70 \cdot 10^{-6}} = 0,2$$

Ответ: 20 см.

Пример 6. Обычная швейная игла имеет длину $l = 3,5$ см и массу $m = 0,1$ г. Будет ли игла лежать на поверхности воды, если ее положить аккуратно?

Решение:

Сравним силу тяжести и силу поверхностного натяжения (коэффициент поверхностного натяжения воды найдем в таблице):

$$\begin{aligned} F_t &= mg = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 = 0,98 \cdot 10^{-3} \\ F_n &= \sigma l = 73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,035 = 2,56 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Так как $F_n > F_t$, то игла будет лежать.

Ответ: да.

4. Задачи для самостоятельного решения

1. Вычислите поверхностное натяжение толуола ($C_6H_5CH_3$) при $50^\circ C$, если при медленном выпуске из сталагмометра масса 38 капель составила 1,4864 г, а масса 25 капель воды при таких же условиях равна 2,6570 г. Сравните полученный результат с табличным значением.
2. Вычислите поверхностное натяжение ацетона при $20^\circ C$, учитывая, что в капиллярной трубке радиусом 0,0234 см ацетон поднялся на высоту 2,56 см.
3. Поверхностное натяжение метанола при $20^\circ C$ $33,6 \times 10^{-3}$ Н/м. Чему равен радиус капилляра, в котором жидкость поднялась на 1,5 см?
4. При измерении поверхностного натяжения методом Ребиндера средняя разность высот уровней жидкости в манометре при $30^\circ C$ составила: для воды 8,8 см, для этанола 2,7 см. Найти поверхностное натяжение спирта.
5. Вариантом метода капиллярного поднятия является метод двойного капилляра, в котором поверхностное натяжение определяется разностью высот, на которые поднялась жидкость в обоих капиллярах, и разностью между радиусами капилляров. Вывести формулу для расчета поверхностного натяжения.

Приложение

Поверхностное натяжение некоторых жидкостей при температуре $20^\circ C$, $\sigma \times 10^{-3}$ Н/м

№	Вещество	$\sigma \times 10^{-3}$ Н/м	№	Вещество	$\sigma \times 10^{-3}$ Н/м
1	Вода	72,75	10	Пентан	16,00
2	Метанол	22,60	11	Гексан	18,46
3	Этанол	22,03	12	Гептан	20,86
4	Бутанол	24,6	13	Октан	21,76
5	Бензиловый спирт	42,76	14	Фенол	40,9
6	Бензол	28,78	15	Этиленгликоль	46,10
7	Муравьиная кислота	37,58	16	Глицерин	59,40
8	Уксусная кислота	27,80	17	Хлороформ	27,14
9	Пропионовая кислота	26,70	18	Четыреххлористый углерод	25,68