

## *Лабораторная работа №4*

### **Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости**

Цель работы: познакомиться с различными методами определения коэффициента поверхностного натяжения (КПН) жидкости, практически определить коэффициент поверхностного натяжения водных растворов этилового спирта методом отрыва капель.

Оборудование: мерная бюретка с краном, воронка стеклянная лабораторная, термометр, дистиллированная вода, водные растворы этилового спирта.

#### **Вопросы входного контроля**

1. Молекулярное строение жидкостей.
2. Что называется длиной свободного пробега молекулы, временем оседлой жизни молекулы и эффективным диаметром молекулы.
3. Силы взаимодействия между молекулами жидкости и их зависимость от расстояния.
4. Дайте определение механической работы и энергии.
5. Как определяется длина окружности и площадь круга.

#### **Краткая теория**

Поверхностное натяжение является важной силовой и энергетической характеристикой жидкости и играет большую роль в медицине. Коэффициент поверхностного натяжения биологических жидкостей в некоторых случаях может служить диагностическим фактором. Так, например, при заболевании желтухой поверхностное натяжение мочи резко уменьшается вследствие появления в моче желчных кислот. При диабете и некоторых других заболеваниях повышается содержание липазы в крови. О содержании липазы судят по изменению коэффициента поверхностного натяжения раствора трибутилена при добавлении в него крови.

#### **Особенности молекулярного строения жидкостей**

К жидкостям относят вещества, которые по своим свойствам занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. Подобно твердым телам жидкости мало сжимаемы, обладают большой плотностью; подобно газам принимают форму

сосуда, в котором находятся. Такой характер свойств жидкостей связан с особенностями теплового движения их молекул. Молекулы в жидкости находятся на близком расстоянии друг от друга, поэтому между ними действуют значительные силы молекулярного притяжения и отталкивания.

Представления о существенной роли межмолекулярных сил впервые ввел нидерландский физик Я.Д. Ван-дер-Ваальс. Он считал, что на малых расстояниях между молекулами действуют силы отталкивания, которые с увеличением расстояния сменяются силами притяжения, сравнительно медленно убывающими при дальнейшем увеличении расстояния. Силы межмолекулярного взаимодействия часто называют ван-дер-ваальсовыми силами.

Рассмотрим, как меняется в зависимости от расстояния между молекулами проекция результирующей силы взаимодействия между ними на прямую, соединяющую центры молекул. На расстояниях, превышающих 2 – 3 диаметра молекул, сила отталкивания практически равна нулю. Заметна лишь сила притяжения. По мере уменьшения расстояния сила притяжения возрастает и одновременно начинает сказываться сила отталкивания. Эта сила очень быстро увеличивается, когда электронные оболочки молекул начинают перекрываться.

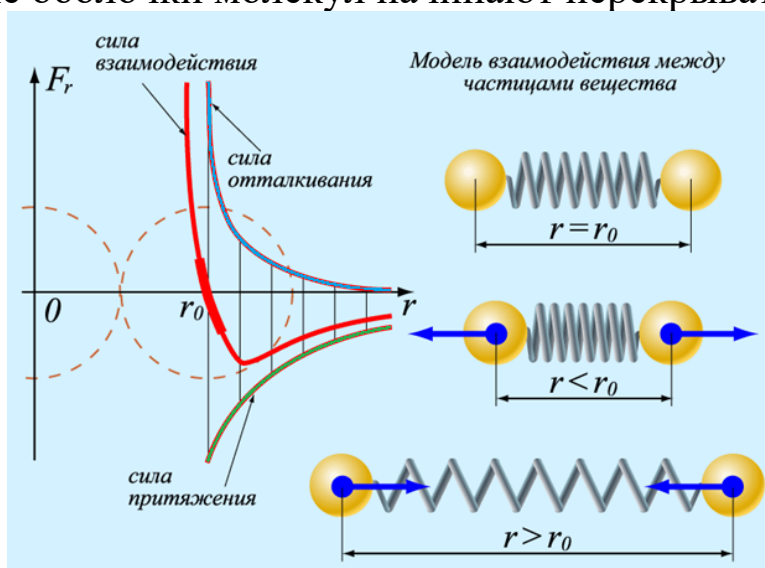


Рис. 1. График зависимости сил взаимодействия между молекулами.

На рисунке 1 графически изображена зависимость проекции силы взаимодействия молекул  $F_r$  от расстояния между их

центрами. На расстоянии  $r_0$ , примерно равном сумме радиусов молекул,  $F_r = 0$ , так как сила притяжения равна по модулю силе отталкивания. При  $r < r_0$  действует сила отталкивания с положительным значением проекции  $F_r$ . При  $r > r_0$  между молекулами действует сила притяжения. Проекция силы, действующей на правую молекулу, отрицательна.

Всякое тело находится не в вакууме, а в какой-либо другой среде, например, в атмосфере. Поэтому следует говорить не просто о взаимодействии молекул внутри тела или на его поверхности, а о поверхностях раздела двух сред. На поверхностях раздела жидкости и ее насыщенного пара, двух несмешиваемых жидкостей, жидкости и твердого тела возникают силы, обусловленные различным межмолекулярным взаимодействием граничащих сред: прежде всего водородными связями и более слабыми неполярными взаимодействиями.

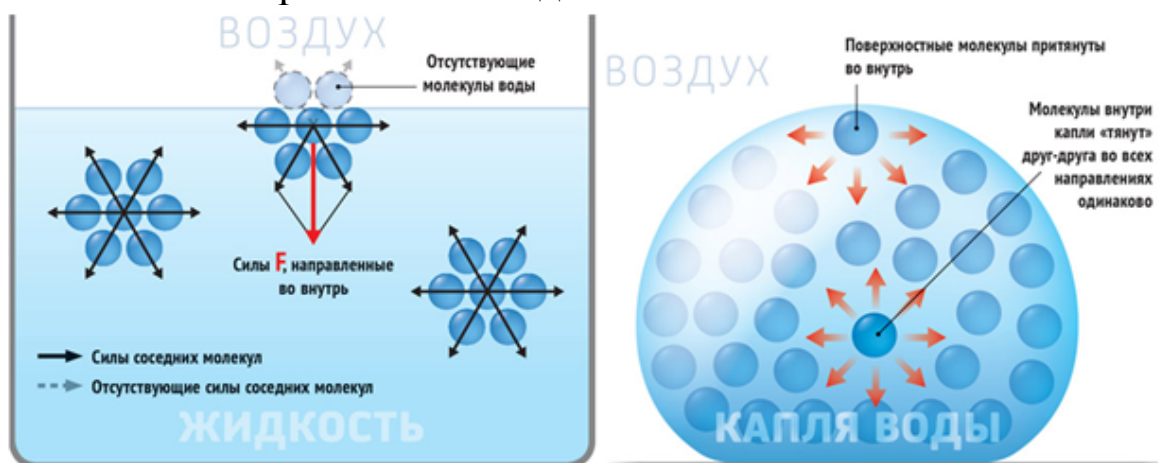


Рис. 2. Схема взаимодействия молекул со своими соседями.

Молекулы внутри жидкости окружены со всех сторон такими же молекулами (рис. 2), поэтому силы притяжения со стороны соседей скомпенсированы. Векторная сумма сил притяжения со стороны соседей равна нулю, молекула находится в равновесии. Молекулы, расположенные вблизи поверхности в некотором тонком поверхностном слое (рис. 2), находятся в условиях, отличных от условий внутри тела: молекулы же вблизи поверхности имеют одинаковых с ними соседей лишь с трех сторон. Поэтому силы притяжения со стороны соседей не скомпенсированы, а значит, на нее действует не скомпенсированная сила  $F_p$ , направленная внутрь жидкости. Из-за

этого молекула стремится перейти туда же, вглубь. При этом поверхность жидкости стремиться уменьшиться.

Это приводит к тому, что энергия молекул в поверхностном слое отлична от их энергии внутри тела. Разность между энергией всех молекул вблизи поверхности раздела и той энергией, которую эти молекулы имели бы, если бы они находились внутри тела, называется поверхностной энергией.

**Поверхностная энергия** – это избыток энергии поверхностного слоя на границе раздела фаз (по сравнению с энергией вещества внутри тела), обусловленный различием межмолекулярных взаимодействий в обоих веществах.

Очевидно, что поверхностная энергия  $W_{нов}$  пропорциональна площади  $S$  поверхности раздела:

$$W_{нов} = \sigma \cdot S. \quad (1)$$

Коэффициент  $\sigma$  (греческая буква «сигма») называется коэффициентом поверхностного натяжения и зависит от природы соприкасающихся сред и от их состояния. Часто этот коэффициент называют коротко поверхностным натяжением. Не следует путать явление поверхностного натяжения с коэффициентом поверхностного натяжения, характеризующим это явление.

Известно из механики, что силы действуют всегда так, чтобы привести тело в состояние с наименьшей энергией. В частности, и поверхностная энергия  $W_{нов}$  стремится принять наименьшее возможное значение.

Из этого следует, что поверхность раздела двух сред всегда стремится уменьшиться. Именно с этим связано стремление капелек жидкости (или пузырьков газа) принять сферическую форму: при заданном объеме шар обладает наименьшей из всех фигур поверхностью (рис. 2). Этому стремлению противодействует влияние сил тяжести, но для маленьких капелек это влияние слабо и их форма близка к сферической.

При этом молекулы поверхностного слоя втягиваются внутрь жидкости. Для перемещения молекул из жидкости на ее поверхность требуется совершить работу  $A$ , по модулю равную поверхностной энергии, т.е.:

$$A = W_{нов} = \sigma \cdot S. \quad (2)$$

Отсюда следует определение коэффициента поверхностного натяжения.

**Коэффициент поверхностного натяжения** (поверхностное натяжение)  $\sigma$  равен работе  $A$ , требуемой для образования поверхности жидкости площадью  $S$  при постоянной температуре:

$$\sigma = \frac{A}{S}. \quad (3)$$

Поверхностное натяжение может быть определено не только энергетически. Поверхностное натяжение проявляет себя и как сила. Существование этой силы наглядно иллюстрируется опытом Дюпре.

На жесткой проволочной рамке закреплена подвижная перемычка шириной  $d$  (рис. 3). В рамке натянута двусторонняя мыльная пленка (положение 1). Чтобы растянуть эту пленку до положения 2, надо приложить силу  $F_2$ , которой противодействует сила поверхностного натяжения  $F_n$ . Если отпустить перемычку, то она вернется в прежнее положение 1. Это произойдет под действием силы поверхностного натяжения. Эта сила направлена вдоль поверхности (по касательной), перпендикулярно к контуру, ограничивающему поверхность. Для пленки роль части контура играет подвижная перемычка.

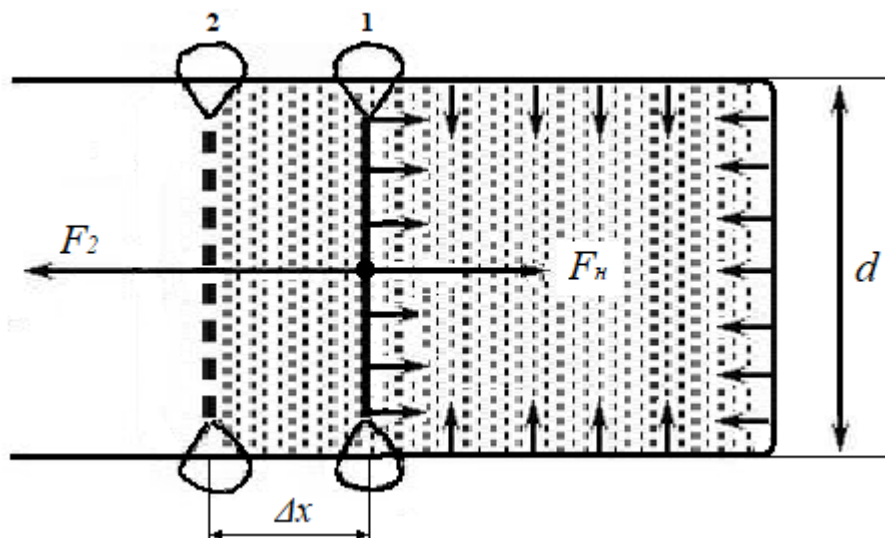


Рис. 3. Схема опыта Дюпре.

При растяжении пленки в положение 2 на величину  $\Delta x$ , совершается механическая работа  $A = F_2 \cdot \Delta x$ . Если растяжение производить плавно, то равнодействующая сил  $F_2$  и  $F_n$  будет равна нулю и эти силы будут находиться в равновесии  $F_2 = F_n$ . Тогда можем записать, что  $A = F_n \cdot \Delta x$ . Эта работа будет затрачиваться на

изменение поверхностной энергии, т.е.  $A = \Delta W$ , где  $\Delta W = \sigma \cdot \Delta S$ . Здесь величина  $\Delta S$  характеризует не площадь мыльной пленки, а изменение площади поверхности жидкости, образующей эту пленку при растяжении в положение 2. Выше было сказано, что мыльная пленка двусторонняя, поэтому изменение площади  $\Delta S = \Delta x \cdot 2d$ . Величину  $2d$  обозначим за  $l$ , которая будет являться длиной границы свободной поверхности жидкости.

Таким образом, подставив значение работы и изменение поверхностной энергии, получаем выражение:  $F_n \cdot \Delta x = \sigma \cdot \Delta x \cdot l$ .

Сократив на  $\Delta x$  и выразив  $\sigma$ , получим **второе определение**: коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  равен силе поверхностного натяжения  $F_n$ , действующей на единицу длины  $l$  контура, на котором действует эта сила (линии возможного разрыва):

$$\sigma = \frac{F_n}{l}. \quad (4)$$

Размерность  $\sigma$  вытекает из его определения и может быть представлена в различных видах: энергия на единицу площади (Дж/м<sup>2</sup>) или сила на единицу длины (Н/м). Анализ размерностей показывает равнозначность этих единиц:

$$\sigma = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right].$$

При указании значения коэффициента поверхностного натяжения надо указывать, о соприкосновении каких именно двух сред идет речь. Просто поверхностным натяжением жидкости (без указания второй среды) часто называют поверхностное натяжение на границе данной жидкости и ее пара (или воздуха). Эта величина уменьшается с повышением температуры линейно.

Силы поверхностного натяжения никак не изменяются по мере сокращения площади поверхности пленки, так как плотность жидкости, а, следовательно, и среднее расстояние между молекулами на поверхности не изменяется.

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от сил молекулярного взаимодействия и принимает различные значения для разных жидкостей. У легковоспламеняющихся жидкостей (эфир, спирт, бензин) молекулярные силы, а, следовательно, и величина поверхностного натяжения меньше, чем у нелетучих жидкостей (например, у ртути и других жидких металлов).

Таблица 1

Значение коэффициентов поверхностного натяжения некоторых жидкостей при температуре 20° С (вторая среда воздух)

<i><b>Жидкость</b></i>	<i><b><math>\sigma</math>, мН/м</b></i>	<i><b>Жидкость</b></i>	<i><b><math>\sigma</math>, мН/м</b></i>
<i>Вода</i>	<i>72,5</i>	<i>Ртуть</i>	<i>465,0</i>
<i>Желчь</i>	<i>48,0</i>	<i>Спирт</i>	<i>22,0</i>
<i>Молоко</i>	<i>50,0</i>	<i>Сыворотка крови</i>	<i>56,0</i>
<i>Моча</i>	<i>66,0</i>	<i>Эфир</i>	<i>17,0</i>

Минимальное поверхностное натяжение имеет жидкий гелий на его границе со своим паром – всего лишь 3,5 мН/м (вблизи абсолютного нуля). У большинства веществ поверхностное натяжение колеблется от 10 до 2000 мН/м. Мембраны биологических клеток имеют  $\sigma = 100$  мН/м.

Величина поверхностного натяжения имеет диагностическое значение в клинике. Обычно поверхностное натяжение биологических жидкостей сравнивают с водой – 72,5 мН/м при комнатной температуре. Например, в норме для мочи человека  $\sigma$  равен 66 мН/м, а при появлении в моче желчных пигментов снижается до 56 мН/м.

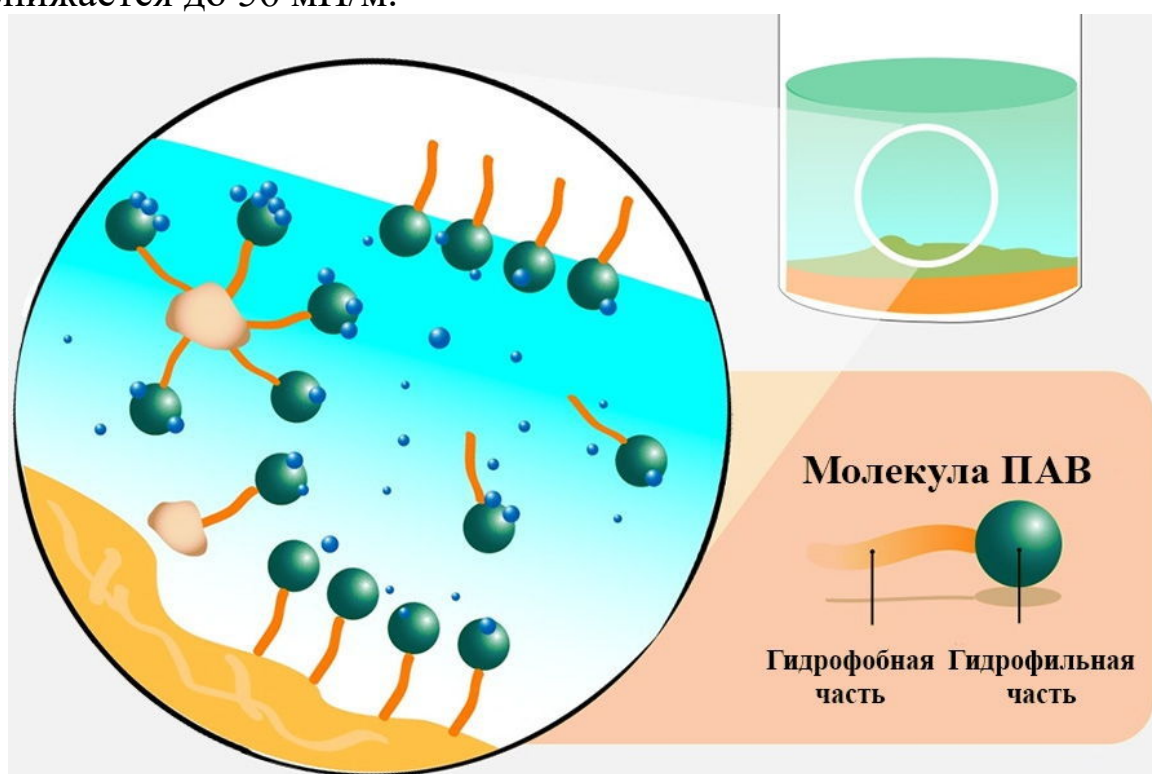


Рис. 4. Структура и принцип работы ПАВ.



Растворенные в жидкости вещества способны как понижать, так и несколько повышать поверхностное натяжение. Растворенные вещества, понижающие поверхностное натяжение жидкости, называют поверхностно-активными веществами (ПАВ). Они уменьшают энергию поверхностного слоя. Примерами ПАВ в быту могут служить мыло и стиральные порошки.

Поверхностно-активные вещества имеют дифильное строение. Молекулы ПАВ состоят из гидрофильной и гидрофобной (олеофильной) частей, что является характерной отличительной особенностью их строения. Гидрофильная часть представлена полярными группами:  $-\text{COOH}$ ;  $-\text{NH}_2$ ;  $-\text{OH}$ ;  $-\text{SO}_3\text{H}$ ;  $-\text{NO}_2$  и др. Гидрофобную часть образуют углеводородные радикалы парафиновых, нафтяных и ароматических углеводородов (рис. 4).

Общее количество вещества, которое вообще может закрепиться (адсорбироваться) на поверхности жидкости, очень мало. Поэтому даже ничтожные примеси ПАВ, скапливаясь на поверхности жидкости, могут существенно изменить ее поверхностное натяжение. Поверхностное натяжение жидкости очень чувствительно к ее чистоте. Так, небольшие добавки мыла могут уменьшить поверхностное натяжение воды более чем в 3 раза.

## **Методы определения коэффициента поверхностного натяжения**

### ***1. Метод отрыва капель***

Малый объем жидкости сам по себе принимает форму, близкую к шару, так как благодаря малой массе жидкости мала и сила тяжести, действующая на нее. Этим объясняется шарообразная форма небольших капель жидкости.

На рисунке 5 показаны различные стадии процесса образования и отрыва капли. Фотография получена с помощью скоростной киносъемки, капля растет медленно, можно считать, что в каждый момент времени она находится в равновесии. Поверхностное натяжение вызывает сокращение поверхности капли, оно стремится придать капле сферическую форму. Сила тяжести, наоборот, стремится расположить центр тяжести капли как можно ниже. В результате капля оказывается вытянутой.





Рис. 5. Процесс образования и отрыва капли.

Чем больше капля, тем большую роль играет потенциальная энергия силы тяжести. Основная масса по мере роста капли собирается внизу и у капли образуется шейка. Сила поверхностного натяжения направлена вертикально по касательной к шейке (рис. 6) и она уравнивает силу тяжести, действующую на каплю. Теперь достаточно капле совсем немного увеличиться и силы поверхностного натяжения уже не смогут удержать каплю. Шейка капли быстро сужается и в результате капля отрывается.

Из наблюдений над отрывом капли можно определить численное значение коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Действительно, для момента отрыва капли можно считать, что:

$$F_n = F_m, \quad (5)$$

где  $F_n$  – сила поверхностного натяжения,  $F_m = mg$  – сила тяжести.

В соответствии с формулой (4) и с учетом того, что длина контура, на который действует сила поверхностного натяжения, равна длине окружности отверстия (см. рис. 6)  $l = 2\pi r$ , сила поверхностного натяжения:

$$F_n = \sigma \cdot l = \sigma \cdot 2\pi r,$$

где  $r$  – радиус самого узкого места шейки (перетяжка).

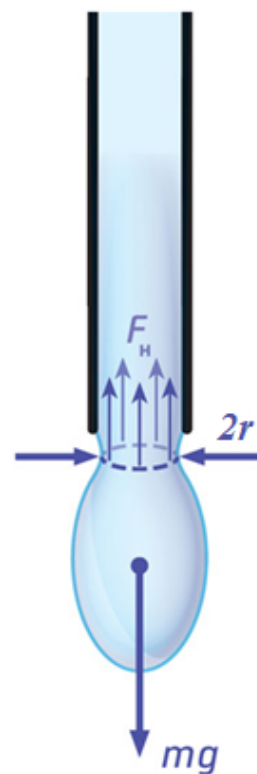


Рис. 6.

Направление действия сил в момент отрыва капли.

Тогда, после подстановок в формулу (5), получаем равенство:

$$\sigma \cdot 2\pi r = mg,$$

из которого может быть выражена величина поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r}. \quad (6)$$

Массу одной капли  $m$  можно определить на аналитических весах, но взвешивать каждую каплю было бы затруднительно. Однако конструкция мерной бюретки позволяет легко рассчитать среднюю массу отрывающихся капель, если известна плотность жидкости  $\rho$  и объем жидкости  $V$ , заключенный между метками бюретки. Подсчитывают число капель  $n$ , оторвавшихся за то время, пока уровень жидкости опускается от верхней до нижней метки. Поскольку число капель в объеме  $V$  равно  $n$ , то масса одной капли:

$$m = \frac{\rho \cdot V}{n}. \quad (7)$$

После подстановки выражения (7) в формулу (6), получаем:

$$\sigma = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{2\pi r \cdot n}. \quad (8)$$

Расчет по этой формуле требует точного измерения радиуса перетяжки и объема вытекающей жидкости. Поэтому на практике часто предпочитают использовать сравнительный метод или метод эталонной жидкости. Он заключается в том, что, работая с одной мерной бюреткой, подсчитывают число капель при вытекании равных объемов ( $V_0 = V_i$ ) эталонной жидкости, поверхностное натяжение  $\sigma_0$  которой известно, и для исследуемой жидкости. Отношение поверхностного натяжения исследуемой жидкости  $\sigma_i$  к поверхностному натяжению эталонной жидкости при подстановке формулы (8) преобразуется в уравнение:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_0} = \frac{\rho_i \cdot V_i \cdot g \cdot 2\pi r \cdot n_0}{\rho_0 \cdot V_0 \cdot g \cdot 2\pi r \cdot n_i} = \frac{\rho_i \cdot n_0}{\rho_0 \cdot n_i}, \quad (9)$$

откуда поверхностное натяжение исследуемой жидкости равно:

$$\sigma_i = \sigma_0 \frac{\rho_i \cdot n_0}{\rho_0 \cdot n_i}. \quad (10)$$

где  $\rho_i$  и  $\rho_0$  – плотность исследуемой и эталонной жидкостей, так и  $n_i$  и  $n_0$  – количество капель этих жидкостей, при их истечении соответственно.

Данная формула (10) будет использована нами для экспериментального определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Хотя метод отрыва капль и не является очень точным, однако, применяется в медицинской практике. Этим методом определяют в диагностических целях поверхностное натяжение спинномозговой жидкости, желчи и т.д.

## **2. Метод отрыва кольца. Смачивание**

Молекулы в жидкостях скреплены водородными связями. Они достаточно слабые, но играют важную роль в поведении жидкости на различных поверхностях. Способность какой-либо поверхности к смачиванию зависит от умения создавать водородные связи с молекулами жидкости. К примеру, причиной хорошего смачивания стекла является наличие атомов кислорода в структуре стекла, именно они формируют водородные связи с водой. При необходимости от этого эффекта можно избавиться, покрыв стекло тонким слоем жира или другого гидрофобного вещества. Жидкость соберётся в капельки под действием уже сил поверхностного натяжения и свободно скатится со стекла (рис. 7).

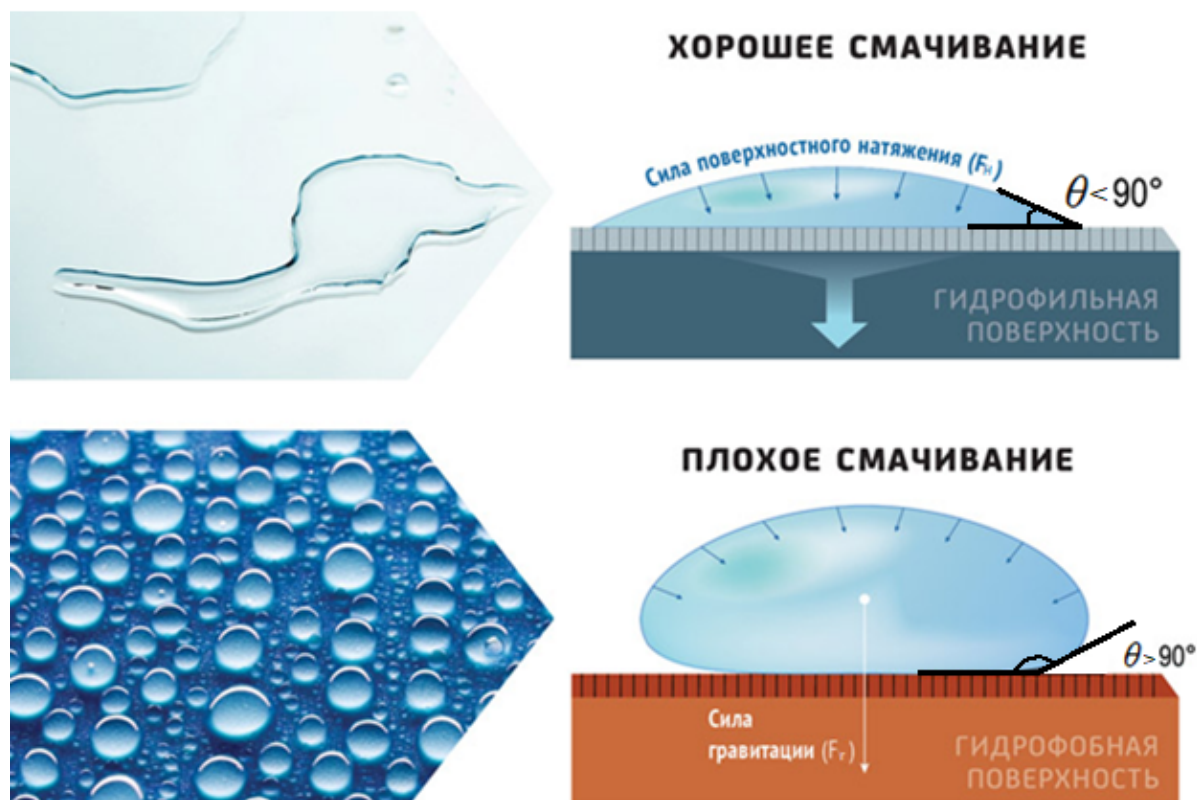


Рис. 7. Механизм смачивания стекла.

**Смачивание** – это явление, возникающее вследствие взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердых тел и приводящее к искривлению поверхности жидкости у поверхности твердого тела.

Смачивание проявляется в растекании жидкости по твердой поверхности, находящейся в контакте с газом (паром) или другой жидкостью, из-за наличия межмолекулярных сил притяжения, возникающих между молекулами твердого тела и молекулами растекающейся жидкости.

Количественно смачивание характеризуется *углом смачивания (краевым углом)*.

**Угол смачивания  $\theta$**  («тэта») – это угол между смачиваемой поверхностью твердого тела и поверхностью жидкости на границе «жидкость–твердое тело» (точнее между смачиваемой поверхностью и касательной к поверхности жидкости в точке данной границы) (рис. 8).

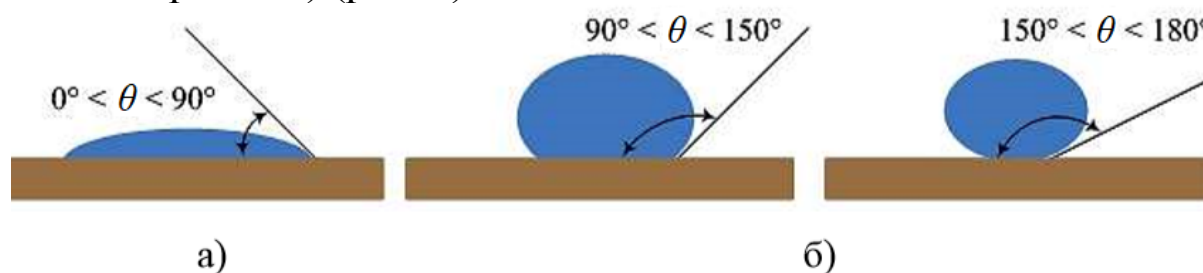


Рис. 8. Примеры смачивания поверхности жидкостями:

- а) смачивание гидрофильной поверхности;
- б) смачивание гидрофобной поверхности.

При смачивании  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  и чем меньше угол  $\theta$ , тем сильнее смачивание. Если  $\theta = 0^\circ$ , то смачивание называют **полным** или **идеальным**. При идеальном смачивании капля жидкости растекается по поверхности твердого тела до тех пор, пока не покроет всю поверхность или пока не образуется мономолекулярный слой. К случаю идеального смачивания можно приближенно отнести растекание спирта или воды по чистой поверхности стекла, нефти по воде и пр.

При несмачивании  $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$  и чем больше угол  $\theta$ , тем сильнее выражено несмачивание, при  $\theta = 180^\circ$  будет **полное несмачивание**. В этом случае жидкость не прилипает к поверхности твердого тела и легко скатывается с нее.

Для измерения КПН методом отрыва кольца используется установка, изображенная на рисунке 9.

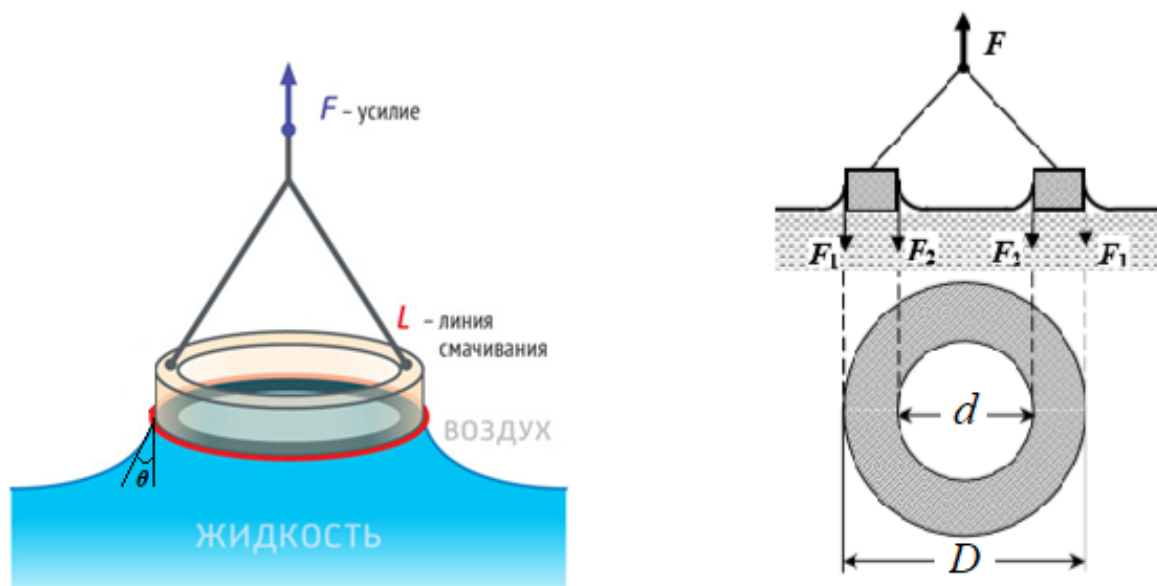


Рис 9. Схема измерения КПН методом отрыва кольца.

На поверхность исследуемой жидкости помещают кольцо. Если жидкость смачивает кольцо, то силы поверхностного натяжения  $F_1$  и  $F_2$ , действующие на его наружную и внутреннюю поверхности диаметрами  $D$  и  $d$ , направлены внутрь жидкости, как показано на рисунке 9, и создают суммарную силу поверхностного натяжения, равную:

$$F_n = \sigma \cdot L.$$

где  $L$  – длина граничной линии поверхности (линия смачивания).

Длина  $L$  равна сумме длин наружной и внутренней окружностей кольца:

$$L = \pi D + \pi d = \pi(D + d).$$

Тогда

$$F_n = \sigma \cdot \pi(D + d). \quad (11)$$

Чтобы оторвать кольцо от поверхности жидкости, надо приложить направленную вверх силу  $F$ , которая скомпенсирует силу тяжести  $mg$  кольца и силу поверхностного натяжения  $F_n$ :

$$F = F_n + mg. \quad (12)$$

Измерив с помощью динамометра или весов силу отрыва кольца  $F$  и зная его массу и размеры, из соотношений (11) и (12)

получают выражение для коэффициента поверхностного натяжения жидкости:

$$\sigma = \frac{F - mg}{\pi(D + d)}. \quad (13)$$

В данном выражении угол смачивания  $\theta \approx 0^\circ$ .

### 3. Капиллярный метод. Капиллярные явления.

#### Формула Лапласа

Уже указывалось, что молекулы поверхностного слоя втягиваются внутрь объема жидкости, вследствие чего поверхностный слой оказывает молекулярное давление на жидкость. Если поверхность жидкости плоская, то все силы, действующие на каждую молекулу  $M_1$  (рис. 10) поверхностного слоя, параллельны друг другу и оказывают на поверхность жидкости молекулярное давление  $p_0$ . При этом вклад сил поверхностного натяжения в это молекулярное давление равен нулю, так как на плоской поверхности эти силы направлены противоположно и компенсируют друг друга.

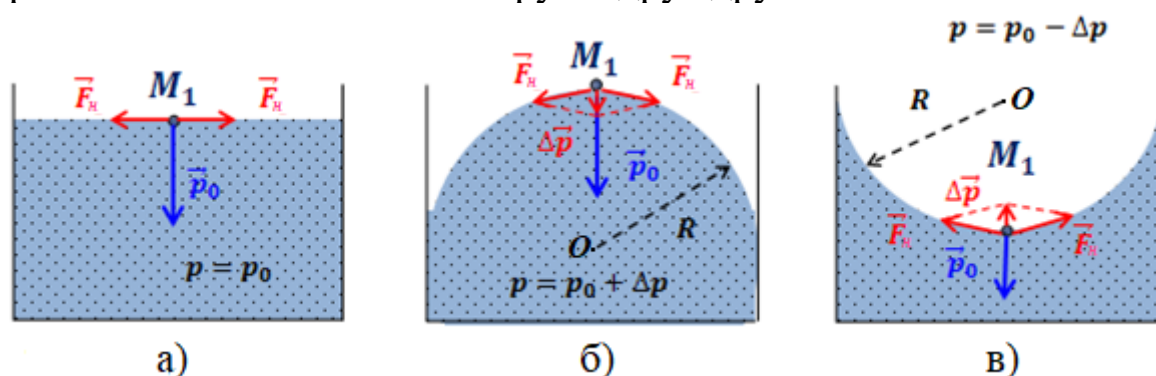


Рис 10. Силы, создающие молекулярное давление под плоской а), выпуклой б) и вогнутой в) поверхностями.

Если же поверхность жидкости по каким-либо причинам искривлена, то силы поверхностного натяжения, действующие на молекулы  $M_1$  направлены под углом и уже не компенсируют друг друга, а их результирующая направлена в центр кривизны поверхности и оказывает на поверхность дополнительное молекулярное давление  $\Delta p$ , величина которого рассчитывается по формуле Лапласа:



$$\Delta p = \sigma \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (14)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны поверхности жидкости в двух взаимно перпендикулярных сечениях.

Если поверхность жидкости сферическая, то  $R_1 = R_2 = R$  и добавочное давление Лапласа равно:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}, \quad (15)$$

Поскольку силы, создающие дополнительное молекулярное давление, направлены всегда к центру кривизны поверхности, то и дополнительному давлению  $\Delta p$  приписывают такую же направленность. В результате молекулярное давление под выпуклой поверхностью жидкости всегда больше, а под вогнутой – меньше, чем под плоской поверхностью:

$$p_{\text{вып}} = p_0 + \Delta p; \quad p_{\text{вогн}} = p_0 - \Delta p.$$

*Формула Лапласа* читается так: дополнительное давление под изогнутой поверхностью жидкости вследствие действия сил поверхностного натяжения прямо пропорционально коэффициенту поверхностного натяжения  $\sigma$ , обратно пропорционально радиусу кривизны поверхности жидкости  $R$  и направлено в сторону вогнутости (к центру кривизны).

Справедливость формулы Лапласа (15) для сферической поверхности легко показать на примере капли жидкости, находящейся в условиях невесомости, где она имеет сферическую форму. Для этого мысленно рассечём каплю жидкости радиуса  $R$  на два полушария диаметральной плоскостью (рис. 11). Каждая половина капли находится в положении равновесия под действием сил поверхностного натяжения  $F_n$ , приложенных к границе разреза длиной  $l$  и сил избыточного давления  $F_d$  сжатой жидкости в капле, действующих на площадь сечения  $S$ .

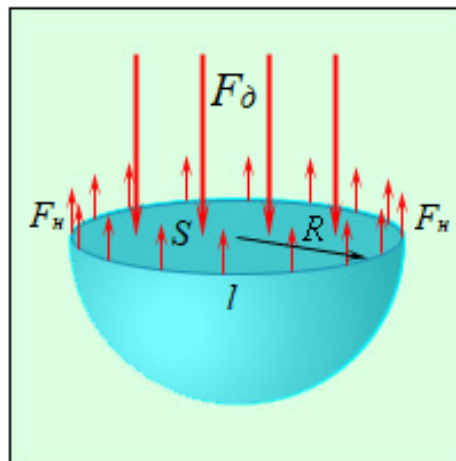


Рис 11. Сечение капли жидкости.



Условие равновесия запишется в виде:  $F_n = F_d$ . Тогда, с учетом того, что  $F_n = \sigma \cdot l$ , где  $l = 2\pi R$ , а  $F_d = \Delta p \cdot S$ , где  $S = \pi R^2$ . Перепишем условие равновесия:  $\sigma \cdot 2\pi R = \Delta p \cdot \pi R^2$ . Сократим и выразим добавочное давление Лапласа  $\Delta p = 2\sigma/R$ .

Формула Лапласа выполняется и для капиллярных явлений.

**Капиллярные явления** – это подъем или опускание жидкости в трубках с малым диаметром – **капиллярах** (от латинского *cappillus* – «волос») – по сравнению с ее уровнем в широких трубках. Граница «жидкость – стенка сосуда» всегда прогибается вниз для смачивающей и вверх для несмачивающей жидкостей. Такая изогнутая поверхность называется **мениском**.

Смачивающая жидкость (например, вода в стеклянной трубке) поднимается по капилляру. Несмачивающая жидкость (например, ртуть при погружении в нее стеклянной трубки) опускается в капилляре ниже уровня жидкости в широком сосуде (рис. 12). При этом, чем меньше радиус трубки, тем на большую высоту она поднимается для смачивающей жидкости и опускается для несмачивающей.

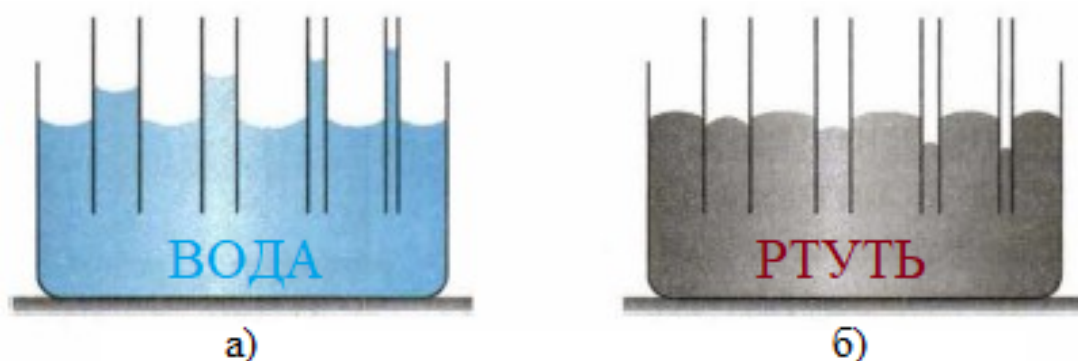


Рис 12. Зависимость уровня жидкости от диаметра капилляра:  
а) поднятие уровня жидкости для смачиваемых поверхностей;  
б) опускание для несмачиваемых.

Тела, пронизанные большим числом тонких каналов (капилляров), активно впитывают в себя воду и другие жидкости. Необходимо только чтобы жидкости смачивали поверхность тела. Именно по этой причине полотенце впитывает в себя воду при вытирании рук. В фитиле спиртовки спирт непрерывно поднимается по капиллярам вверх, где и сгорает. Капиллярные явления весьма распространены, ими обусловлено поднятие воды в почве и

корневой системе растений, движение биологических жидкостей по системе мелких сосудов и канальцев и многие другие явления.

Подробнее разберем физику данного процесса. Если жидкость смачивает стенки капилляра, то образуется вогнутый мениск радиуса  $r$ , молекулярное давление под которым на  $\Delta p$  меньше, чем под плоской поверхностью в широком сосуде, сообщающемся с капилляром. Так как молекулярное давление под плоской поверхностью в широком сосуде на  $\Delta p$  больше, чем в капилляре, то оно выталкивает жидкость в капилляре вверх до тех пор, пока весовое давление образовавшегося столба жидкости высотой  $h$  не скомпенсирует добавочное молекулярное давление  $\Delta p$ :

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (16)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения.

Если жидкость не смачивает капилляр, то образуется выпуклый мениск, молекулярное давление под которым на  $\Delta p$  больше, чем в широком сосуде, направлено вниз и вытесняет жидкость ниже исходного уровня на глубину  $h$ , удовлетворяющую условию (16).

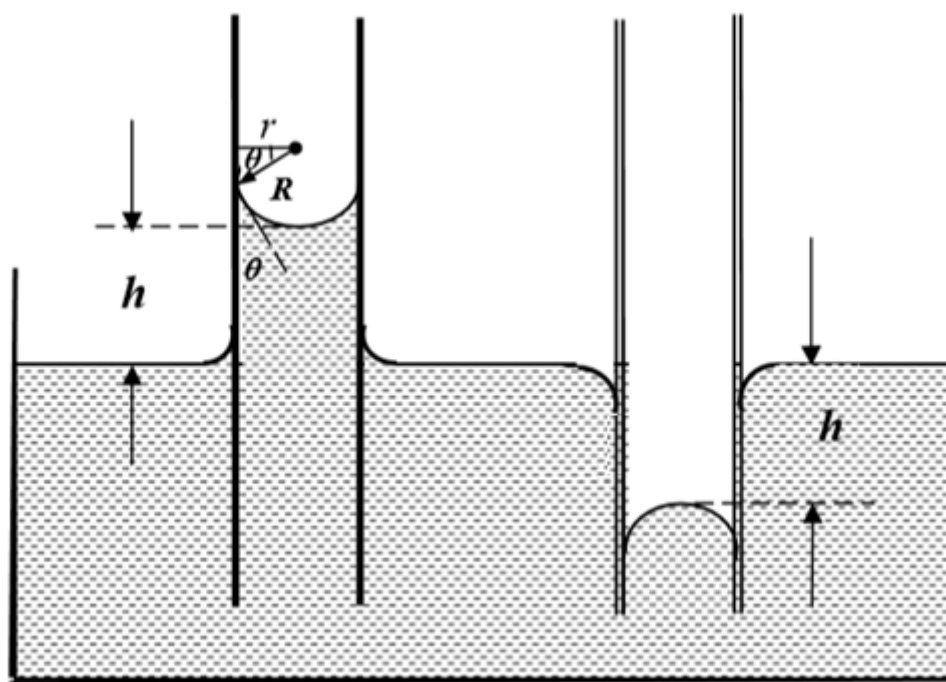


Рис 13. Схема измерения КПН капиллярным методом.

Таким образом, в капилляре жидкость поднимается (или опускается) на такую высоту  $h$ , при которой гидростатическое

давление столба жидкости уравнивает избыточное молекулярное давление, обусловленное кривизной мениска:

$$h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}, \quad (17)$$

Исходя из тригонометрических соображений (рис. 13), радиус кривизны мениска  $R$  связан с радиусом капилляра  $r$  следующим соотношением:

$$R = \frac{r}{\cos \theta},$$

где  $\theta$  – краевой угол.

Тогда, подставив выражение (15) в (17), с учетом того, как радиус кривизны мениска  $R$  связан с радиусом капилляра  $r$ , получим формулу Дж. Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r}, \quad (18)$$

Из формулы (18) видно, что чем тоньше капилляр и лучше смачивание (меньше  $\theta$  и, соответственно, больше  $\cos \theta$ ), тем выше поднимается жидкость по капилляру. При идеальном смачивании ( $\theta = 0$ ,  $\cos \theta = 1$ ,  $R = r$ ) высота подъема максимальна:

$$h_{\max} = \frac{2\sigma}{\rho \cdot g \cdot r}, \quad (19)$$

Если же жидкость не смачивает капилляр, то ее уровень в капилляре опускается на глубину, определяемую формулами (18) и (19), т.е. несмачивающая жидкость «выталкивается» из капилляра. Поэтому такая жидкость не может глубоко проникнуть в поры твердого тела. С этим связана, например, непроницаемость для воды перьев птиц, смазанных жиром.

Капиллярный метод определения КПН жидкости – основан на использовании соотношения (18), путем измерения высоты  $h$  поднятия ее уровня в капилляре известного радиуса  $r$ :

$$\sigma = \frac{\rho \cdot g \cdot r \cdot h}{2}, \quad (20)$$

Основной недостаток этого метода – сложность определения величины краевого угла  $\theta$ , поэтому формула записана для идеального смачивания.

## Роль альвеолярного сурфактанта в процессе дыхания

*Альвеола* (от латинского *alviolus* – ячейка, пузырек) – пузырьковидное образование в легких млекопитающих, оплетенное сетью капилляров. Через стенки альвеол (в легких человека их 700 млн) происходит газообмен между кровью легочных капилляров и воздухом, содержащемся в легких. Диаметр альвеол составляет 0,2 – 0,3 мм. Как сказано выше, каждая альвеола окружена плотной сетью капилляров, поэтому площадь контакта с кровью, протекающей по капиллярам, с альвеолами очень велика.

Газообмен между альвеолярным воздухом и кровью осуществляется путем диффузии. Кровь легочных капилляров отделена от альвеолярного пространства лишь тонким слоем ткани, так называемой альвеолярно-капиллярной мембраной, образованной альвеолярным эпителием, узким интерстициальным пространством (межклеточная среда) и эндотелием капилляров. Общая толщина мембраны мала – около 1 мкм. Внутренняя поверхность альвеол выстлана тонкой пленкой жидкости. Если бы эта пленка состояла только из воды, на внутренней поверхности альвеол действовали бы очень большие силы поверхностного натяжения. Дыхание было бы невозможно, так как стенки каждого альвеолярного пузырька стремились бы схлопнуться (рис. 14а).

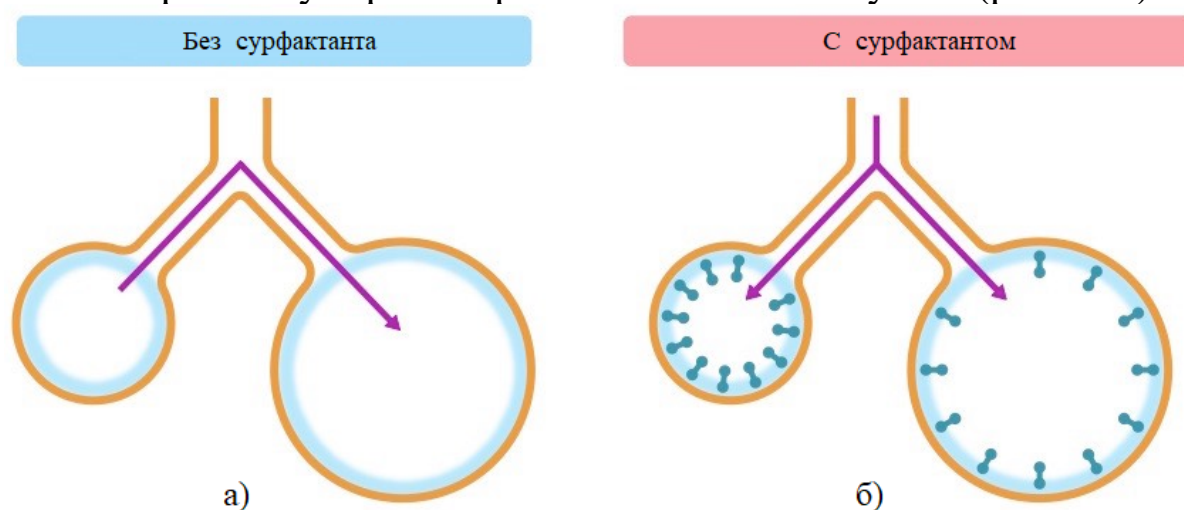


Рис 14. Роль ПАВ в регуляции поверхностного натяжения.

Но поверхностное натяжение  $\sigma_{альв}$  альвеол в 10 раз меньше, чем поверхностное натяжение воды, т.к. в альвеолярной жидкости содержатся вещества, снижающие поверхностное натяжение. О

них мы говорили выше. Они называются ПАВ или, в терминологии медиков и физиологов, сурфактантами. При этом коэффициент поверхностного натяжения альвеол  $\sigma_{альв}$  зависит от толщины пленки  $d$ , их выстилающей. При дыхании толщина пленки меняется: на вдохе она становится тоньше (растягивается) и тогда  $\sigma_{альв} = 50 \cdot 10^{-2}$  Н/м, а на выдохе становится толще (сжимается) и  $\sigma_{альв} = (5-10) \cdot 10^{-2}$  Н/м.

Это связано с тем, что эффект сурфактантов тем выше, чем плотнее располагаются их молекулы, а при уменьшении диаметра альвеол эти молекулы сближаются. Каков же механизм снижения поверхностного натяжения  $\sigma_{альв}$  сурфактантами? В эксперименте было показано, что альвеолярная жидкость содержит смесь белков и липидов. Наибольшей поверхностной активностью из компонентов этой смеси обладают производные лецитина, образующиеся в альвеолярном эпителии. Лецитины (холинфосфоглицериды) – это группа сложных липидов. Гидрофильные части этих молекул прочно связаны с молекулами воды  $H_2O$ , а их гидрофобные части слабо притягиваются друг к другу и к другим молекулам в растворе. Поэтому молекулы сурфактантов образуют на поверхности жидкости тонкий гидрофобный слой (рис. 146).

Согласно формуле Лапласа (15) давление в альвеолах при выдохе и снижении радиуса пузырька  $R$  должно возрастать, однако этому противодействует то, что по мере уменьшения радиуса альвеол снижается и поверхностное натяжение  $\sigma_{альв}$  в них. Таким образом, сурфактанты препятствуют полному схлопыванию мелких альвеол.

### **Газовая эмболия**

С поверхностным натяжением связано и явление газовой эмболии, при котором пузырек газа способен затруднить и даже остановить кровоток в мелких сосудах и лишить кровоснабжения какой-либо орган, что может привести к серьезному функциональному расстройству и даже летальному исходу. Поэтому рассмотрим подробнее поведение пузырька воздуха, находящегося в капилляре с жидкостью.

Пока диаметр газового пузырька меньше диаметра сосуда, он имеет сферическую форму и движется вместе с током крови. Если он попадает в мелкий сосуд, диаметр которого меньше диаметра

пузырька, его мениски деформируются под действием динамического давления текущей крови: передний по току крови мениск вытягивается, его радиус кривизны уменьшается, а задний под напором крови уплощается, его радиус кривизны увеличивается. Соответственно, дополнительные молекулярные давления, действующие на эти мениски, будут не одинаковы и направлены навстречу, а их результирующая сила, приложенная к пузырьку, будет направлена против тока крови, противодействуя ему (рис. 15а), вплоть до остановки кровотока.

Еще более сложная ситуация возникает, когда газовый пузырек попадает на разветвление (бифуркацию) сосудистого русла, и полностью останавливает кровоток в дистально расположенных сосудах (рис. 15б). Таким образом, попавшие в кровь пузырьки воздуха способны закупорить мелкие сосуды.

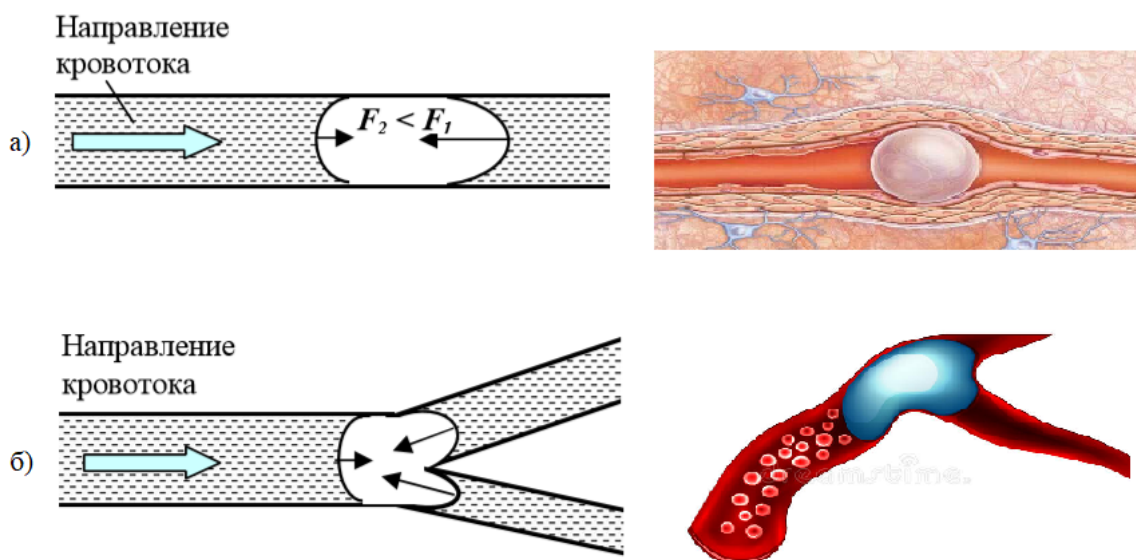


Рис 15. Влияние газового пузырька на кровоток:  
а) в мелком сосуде, б) на разветвлении сосудов.

Воздушная эмболия может возникнуть при ранении крупных вен, где давление крови ниже атмосферного, при неправильно проведенных внутривенных инъекциях и в других ситуациях.

Газовые пузырьки в крови человека и животных могут появиться и при резком снижении внешнего давления на организм, что обусловлено уменьшением растворимости газов (в первую очередь — азота) в крови и переходом их из растворенного состояния в газообразное вследствие резкого снижения окружающего давления. С подобной проблемой могут

столкнуться водолазы при быстром подъеме с большой глубины на поверхность (кессонная болезнь), летчики и космонавты при разгерметизации кабины или скафандра на большой высоте.

### Порядок выполнения работы

Упражнение №1. *Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капель.*

При определении КПН методом отрыва капель используется метод сравнения КПН исследуемой жидкости с КПН эталонной жидкости, например, воды, для которой величина КПН известна (см. таблицу 3).

1. Промыть бюретку водой.

2. Заполнив бюретку дистиллированной водой в объеме 10 – 12 мл и осторожно поворачивая рукоятку крана, добиться раздельного падения капель воды во флакон, расположенный под краном. При этом частота падения капель должна быть невелика для уверенного счета отдельных капель.

3. Пользуясь мерными делениями бюретки подсчитать число капель в выбранном вами объеме воды (2 – 3 мл). Повторить пункт 3 не менее 3-х раз, обращая особое внимание на постоянство объемов вытекающей воды.

4. Полученные данные занести в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Дистиллированная вода		Р-р спирта 10%		Р-р спирта 20%		Р-р спирта 30%	
	$\rho_0=998,2 \text{ (кг/м}^3\text{)}$		$\rho_1=982,4 \text{ (кг/м}^3\text{)}$		$\rho_2=969,6 \text{ (кг/м}^3\text{)}$		$\rho_3=935,7 \text{ (кг/м}^3\text{)}$	
	$n_0$	$\sigma_0 \text{ (Н/м)}$	$n_1$	$\bar{\sigma}_1 \text{ (Н/м)}$	$n_2$	$\bar{\sigma}_2 \text{ (Н/м)}$	$n_3$	$\bar{\sigma}_3 \text{ (Н/м)}$
1								
2								
3								
Ср.								

5. Выполнить пункты 2-4 для водных растворов спирта, начиная с раствора наименьшей концентрации, соблюдая постоянство выбранного объема.

6. По средним значениям полученных результатов определить КПН для всех исследуемых растворов по формуле:



$$\bar{\sigma}_i = \frac{\rho_i \bar{n}_0}{\bar{n}_i \rho_0} \sigma_0, \quad i = 1, 2, 3.$$

Значение  $\sigma_0$  возьмите из таблицы 3.

7. Найти относительные и абсолютные погрешности измерений по формулам:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta n_0}{\bar{n}_0} + \frac{\Delta n_i}{\bar{n}_i} = \frac{\Delta \sigma_i}{\bar{\sigma}_i}, \quad \Delta \sigma_i = \varepsilon_i \bar{\sigma}_i,$$

где  $\Delta n_i = \frac{|\bar{n}_i - n_{i_1}| + |\bar{n}_i - n_{i_2}| + |\bar{n}_i - n_{i_3}|}{3}, \quad i = 0, 1, 2, 3.$

8. Окончательные результаты записать в виде:

$$\sigma_i = \bar{\sigma}_i \pm \Delta \sigma_i \text{ (Н/м)}. \quad i = 1, 2, 3.$$

9. Построить аналогичный график зависимости вычисленных значений КПН от концентрации растворов.

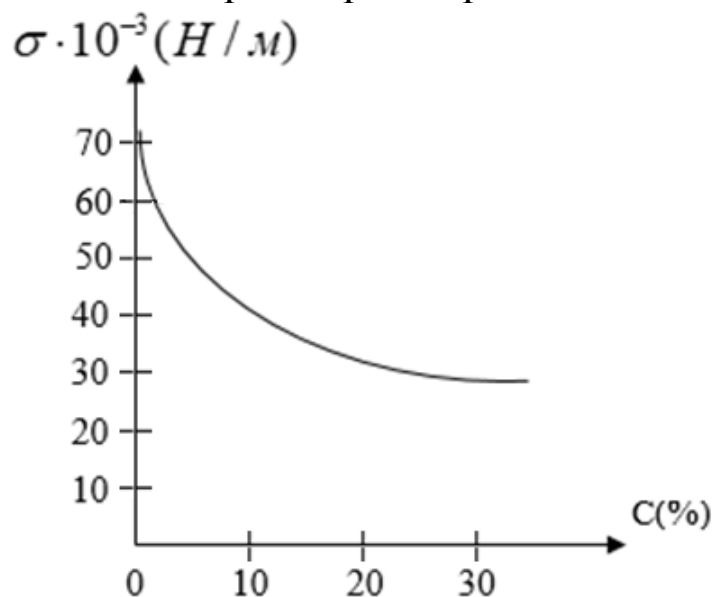


Рис 16. Примерный график зависимости КПН от концентрации.

Таблица 3

Зависимость КПН дистиллированной воды от температуры

t, °C	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$\sigma_0 \cdot 10^{-3}$ , Н/м	73,1	73,0	72,8	72,7	72,5	72,4	72,2	72,0	71,9	71,8

### Контрольные вопросы

1. Физический смысл коэффициента поверхностного натяжения и факторы на него влияющие.
2. Метод отрыва капель.
3. Метод отрыва кольца. Смачивание.
4. Капиллярный метод. Капиллярные явления. Формула Лапласа.
5. Роль альвеолярного сурфактанта в процессе дыхания. Газовая эмболия.

### Задачи

1. Какой диаметр имеет перетяжка при отрыве капли дистиллированной воды массой  $m = 50$  мг? Поверхностное натяжение воды  $\sigma = 72,6$  мН/м, плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.
2. С помощью динамометра тонкое проволочное кольцо массой  $m = 1,5$  г и диаметром  $d = 5$  см отрывают от поверхности жидкости. Динамометр в момент отрыва показывает  $F = 50$  мН. Чему равно поверхностное натяжение жидкости?
3. Кровь в капилляре поднялась на высоту  $h = 22$  мм. Определите коэффициент поверхностного натяжения крови, если внутренний диаметр трубки  $d = 1$  мм.

### Рекомендуемая литература

1. Физика и биофизика. Руководство к практическим занятиям [Электронный ресурс]: учебное пособие. - М. : ГЭОТАР-Медиа, 2013. - ISBN 978-5-9704-2677-7. URL: <http://www.studmedlib.ru/ru/doc/ISBN9785970426777-0002/003.html> [Глава 2, Раздел 3/6, С. 4-6].
2. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика [Электронный ресурс]: учебник - 4-е изд., испр. и перераб. - М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. - ISBN 978-5-9704-2484-1. URL: <http://www.studmedlib.ru/ru/doc/ISBN9785970424841-0012/006.html> [Глава 9, Раздел 13/43, С. 7-10].
3. Эйдельман Е.Д. Физика с элементами биофизики [Электронный ресурс]: учебник - М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. - <http://www.studmedlib.ru/ru/doc/ISBN9785970425244-SCN0009/000.html> [Глава 7, Раздел 10/26, С. 1-11].