

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

А. Б. КРЫЛОВ

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ЯВЛЕНИЯ

Учебно-методическое пособие



Минск БГМУ 2008

УДК 577.35 (075.8)
ББК 24.58 я 73
К 85

Утверждено Научно-методическим советом университета в качестве
учебно-методического пособия 28.11.2007 г., протокол № 3

Рецензенты: доц. каф. мед. и биол. физики Белорусского государственного
медицинского университета, канд. физ.-мат. наук Г. К. Ильич; науч. сотр. Института
физики твердого тела и полупроводников, канд. физ.-мат. наук И. Ф. Медведева

Крылов, А. Б.

К 85 Поверхностное натяжение и связанные с ним явления : учеб-метод. пособие /
А. Б. Крылов. – Минск : БГМУ, 2008. – 32 с.

ISBN 978–985–462–800–4.

Дана необходимая информация о явлении поверхностного натяжения. Приводится его описание и характеристики этого явления. Описаны физические основы капиллярных явлений, газовой эмболии, роль легочного сурфактанта в процессе дыхания. Выводится закон Лапласа. Обсуждается явление адгезии и его проявления в стоматологии. Описаны методы определения коэффициента поверхностного натяжения, а также методика проведения лабораторной работы по определению коэффициента поверхностного натяжения методом Ребиндера.

Предназначается для студентов 1-го курса всех факультетов.

УДК 577.35 (075.8)
ББК 24.58 я 73

ISBN 978–985–462–800–4

© Оформление. Белорусский государственный
медицинский университет, 2008

ПОЧЕМУ ЭТО ВАЖНО ДЛЯ МЕДИКОВ

Наиболее поразительные съемки на космической станции связаны с тем, что пролитая вода не падает вниз, а продолжает парить. Это обусловлено невесомостью — отсутствием силы тяжести. Но еще более поразительно, что вода стремится принять форму шара.

Именно полеты в космос наглядно показали известный в физике факт, что, если бы не было силы тяжести, жидкость стремилась бы приобрести шарообразную форму, т. е. форму с минимальной площадью поверхности. Почему?

Это объясняется поверхностным натяжением, которое является важнейшей характеристикой поверхности раздела двух фаз (т. е. двух веществ в разных агрегатных состояниях (жидкость – твердое тело, жидкость – газ)).

Медикам прекрасно известно, что при лечении различных заболеваний большинство жидких препаратов рекомендуется принимать по рецептуре в определенном количестве капель.

Эти капли образуются при медленном истечении жидкости из небольшого отверстия, причем форма капли определяется силами поверхностного натяжения и силой тяжести. В состоянии невесомости силы тяжести нет, и форма капель полностью определяется силами поверхностного натяжения, стремящимися уменьшить площадь поверхности до минимума и придающими каплям строго шарообразную форму — форму объекта с минимальной площадью поверхности.

С поверхностным натяжением связаны *диспергирование* (измельчение, распыление) твердых тел и жидкостей на малые частицы или капли, *коалесценция* (слияние капель или пузырьков в эмульсиях, туманах, пенах), *коагуляция* (агрегирование частиц дисперсной фазы). Все эти явления важны для фармакологии.

Капиллярные явления также объясняются поверхностным натяжением. Поверхностное натяжение определяет форму клеток и их частей. Изменение сил поверхностного натяжения влияет на *фагоцитоз* (захват клетками соседних частиц), *пиноцитоз* (захват клеточной поверхностью жидкости с содержащимися в ней веществами), а значит и на динамику действия используемых фармакологических лекарственных средств.

Огромное значение имеет явление адгезии (смачивания) между материалом зуба (эмалью и дентином) и пломбировочным материалом, ведь от этого зависит долговечность пломбы и ее прочностные свойства. Адгезия же напрямую зависит от поверхностного натяжения.

Этими причинами и обусловлена необходимость в данном учебно-методическом пособии.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Поверхностное натяжение — это явление, при котором вещество (прежде всего, жидкость) стремится приобрести форму с минимально возможной площадью поверхности. Это достигается за счет наличия сил поверхностного натяжения. Приближение к шаровой форме достигается тем больше, чем слабее силы тяжести. Но даже при нормальной силе тяжести небольшие количества жидких сред стремятся принять шарообразную форму, соответствующую наименьшей величине поверхности, т. к. у малых капель сила поверхностного натяжения значительно превосходит силу тяжести.

Природа сил поверхностного натяжения

Жидкое состояние вещества характеризуется значительно меньшим расстоянием между молекулами, чем в газе, более значительными силами притяжения между молекулами и весьма значительными силами отталкивания, проявляющимися при объемном сжатии. Молекулярное движение частиц жидкости — это, в основном, колебательное движение около среднего положения. Поступательное движение ограничивается обменом местами с соседними частицами.

Строго говоря, всякое тело находится не в вакууме, а в какой-либо другой среде, например, в атмосфере. Поэтому следует говорить не просто о поверхности тел, 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.

Молекулы внутри жидкости окружены со всех сторон такими же молекулами (рис. 1б), поэтому силы притяжения со стороны соседей скомпенсированы. Векторная сумма сил притяжения со стороны соседей равна 0 — молекула находится в равновесии. Молекулы, расположенные вблизи поверхности в некотором тонком поверхностном слое (рис. 1а), 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 нескомпенсированная сила, направленная внутрь жидкости. Из-за этого молекула стремится перейти туда же, вглубь. При этом поверхность жидкости стремится уменьшиться.

Это приводит к тому, что энергия молекул в поверхностном слое отличается 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.

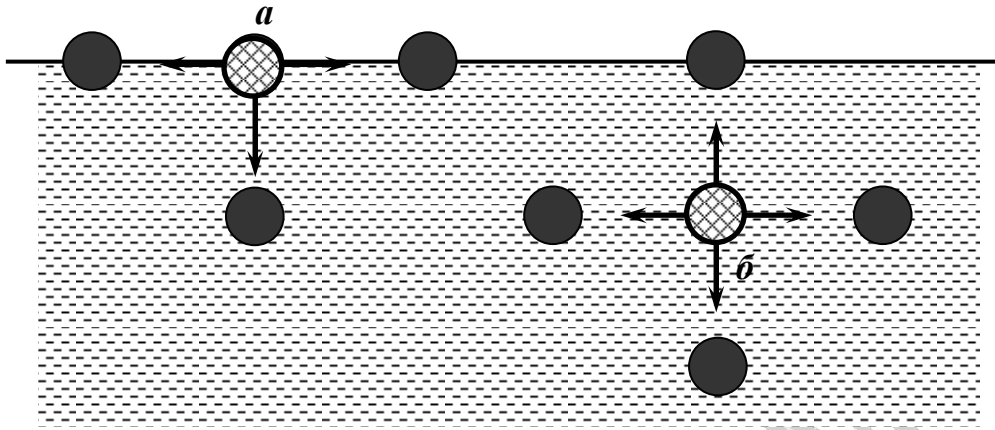


Рис. 1. Схема взаимодействия молекул со своими соседями:

a — молекула, расположенная вблизи поверхности в некотором тонком поверхностном слое, взаимодействует с такими же молекулами только с трех сторон; b — молекула внутри жидкости окружена со всех сторон такими же молекулами

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 $E_{\text{пов}}$ пропорциональна площади S поверхности раздела: $E_{\text{пов}} = \sigma S$. Коэффициент σ (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 $E_{\text{пов}}$ 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. 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. $A = E_{\text{пов}} = \sigma S$. Отсюда следует определение коэффициента поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения (поверхностное натяжение) σ равен работе A , требуемой для образования поверхности жидкости площадью S при постоянной температуре: $\sigma = \frac{A}{S}$.

Поверхностное натяжение может быть определено не только энергетически. Поверхностное натяжение проявляет себя как сила в следующем простом примере. Представим себе пленку жидкости (например, мыльную пленку), натянутую на квадратную проволочную рамку, каждая из сторон которой имеет длину L . Благодаря стремлению поверхности уменьшиться, на проволоку будет действовать сила, которую можно непосредственно измерить. При постоянной силе F работа равна $A = FL$. Тогда:

$$\sigma = \frac{A}{S} = \frac{FL}{LL} = \frac{F}{L}.$$

Таким образом, на линию, ограничивающую поверхность тела (или какой-либо участок этой поверхности), действуют силы, направленные перпендикулярно этой линии по касательной к поверхности, внутрь ее. Поверхностный слой жидкости всегда ограничен линией возможного разрыва и находится под действием сил поверхностного натяжения в постоянном натяжении, стремящемся сократить поверхность. Сокращение поверхности возможно при условии, если силы поверхностного натяжения будут касательными к поверхности и перпендикулярными к линии возможного разрыва.

Отсюда следует **второе определение**: коэффициент поверхностного натяжения σ равен силе поверхностного натяжения F , действующей на единицу длины L отрезка, на котором действует эта сила (линии возможного разрыва): $\sigma = \frac{F}{L}$.

Размерность σ вытекает из его определения и может быть представлена в различных видах: энергия на единицу площади ($\text{Дж}/\text{м}^2$) или сила на единицу длины ($\text{Н}/\text{м}$). Анализ размерностей показывает равнозначность этих единиц: $\text{Дж}/\text{м}^2 = \text{Н м}/\text{м}^2 = \text{Н}/\text{м}$.

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. 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.

Ниже приведены значения поверхностного натяжения для некоторых жидкостей при температуре 20 °С (табл. 1).

Таблица 1

Значение коэффициента поверхностного натяжения σ (в мН/м) для некоторых жидкостей при температуре 20 °С (второй фазой является воздух)

Жидкость	σ , мН/м	Жидкость	σ , мН/м
Вода	72,5	Эфир	17,0
Желчь	48,0	Бензол	29,0
Молоко	50,0	Ртуть	465,0
Спирт	22,0	Золото (1130 °С)	1100,0

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 величина σ плазмы крови, сыворотки и мочи человека составляет соответственно 72, 56 и 70 мН/м. Значит, поверхностное натяжение мочи и плазмы крови близко к воде, а сыворотки — меньше, чем у воды.

Появление же в моче желчных пигментов приводит к резкому снижению σ с 70 до 56 мН/м.

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.

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.

СМАЧИВАНИЕ И НЕСМАЧИВАНИЕ

ЯВЛЕНИЕ СМАЧИВАНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

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 Θ («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. 2).

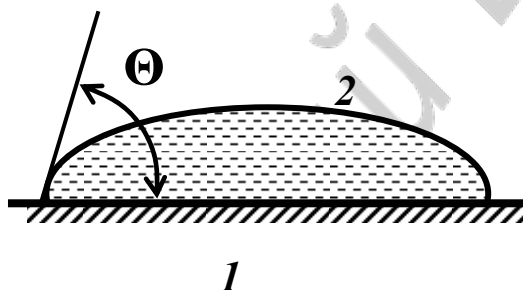


Рис. 2. Определение угла смачивания (краевого угла) Θ :

1 — поверхность твердого тела; 2 — поверхность жидкости; 3 — касательная к поверхности жидкости

Возможны следующие случаи:

1. **Полное смачивание** $\Theta = 0^\circ$ — растекание жидкости по поверхности субстрата до монослоя (например, бензин или нефть на поверхности воды) (рис. 3а).

2. **Сильное смачивание** $0 < \Theta < 90^\circ$ (например, спирт на полированном столе) (рис. 3б); поверхность с сильным смачиванием называют **смачиваемой поверхностью**.

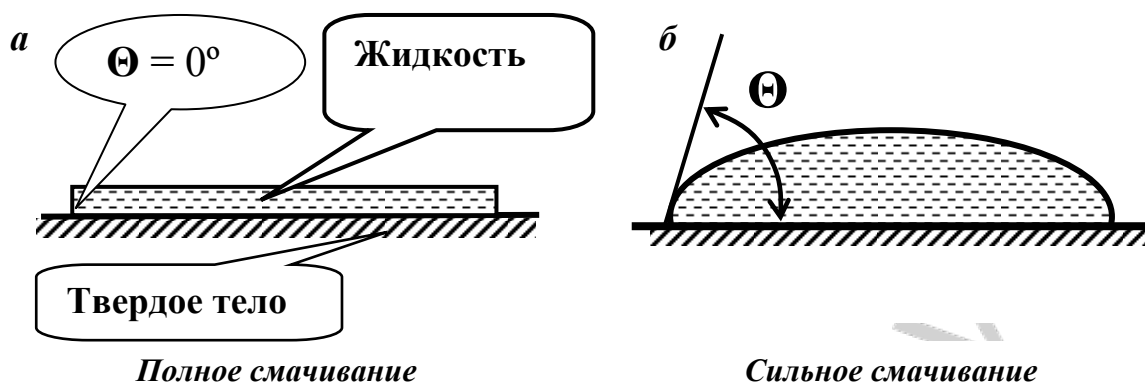


Рис. 3. Значение угла смачивания Θ :
 а — при полном смачивании; б — при сильном смачивании

3. **Слабое смачивание** $90^\circ < \Theta < 180^\circ$ (например, капелька воды на тефлоновой сковородке) (рис. 4а). Такую поверхность называют **несмачиваемой поверхностью**. Так, краевой угол ртути на стекле составляет около 150° , воды на парафине — около 105° . Капли таких жидкостей как бы поджимаются, стараясь уменьшить площадь своего соприкосновения с твердой поверхностью.

4. **Полное несмачивание** $\Theta = 180^\circ$ (например, шарик ртути на тщательно очищенной и отполированной поверхности металла) (рис. 4б).

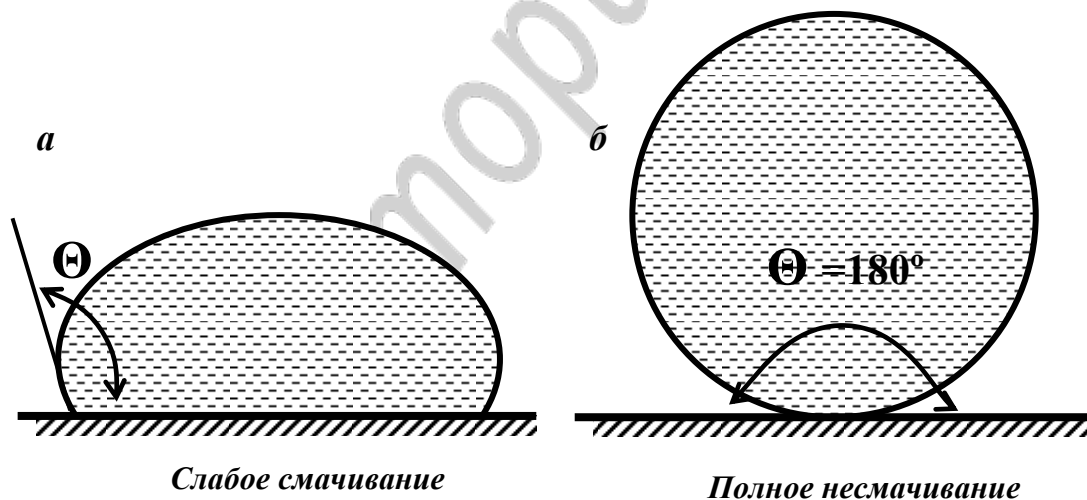


Рис. 4. Значение угла смачивания Θ :
 а — при слабом смачивании; б — при полном несмачивании

С чем связано явление смачивания? Силами притяжения между молекулами жидкости и газа можно пренебречь, но не учитывать взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела нельзя. Чем больше поверхностная энергия жидкости, тем больше силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела, если их привести в соприкосновение.

Форма поверхности жидкости, соприкасающейся с твердым телом, зависит от того, какова величина сил притяжения и какие силы больше: силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела или между молекулами самой жидкости?

Если силы притяжения между молекулами жидкости и молекулам твердого тела меньше, чем между молекулами жидкости, смачивания не происходит (слабое смачивание).

Вода смачивает (хорошо смачивает) стекло и не смачивает (плохо смачивает), например, парафин. Ртуть смачивает цинк и не смачивает стекло, дерево, кожу. Почва, древесина и кора, обезжиренные волокна льна, пеньки, шерсти и т. п. смачиваются водой. Жиры и смолы смачиваются водными растворами щелочей и т. п.

Наличие у веществ поверхностной энергии и смачивания проявляется в виде *адгезии*.

ЯВЛЕНИЕ АДГЕЗИИ

Виды адгезии

Адгезия (от лат. adhaesio — прилипание) — это возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных (твердых или жидких) тел (фаз), приведенных в близкое соприкосновение.

Адгезия является результатом межмолекулярного взаимодействия (типа водородной связи или нековалентных связей), а также ионной или металлической связи. Частным случаем адгезии является *когезия* — взаимодействие соприкасающихся тел, сделанных из одного материала.

Предельный случай адгезии — это явление *хемосорбции* — химическое взаимодействие на поверхности раздела двух веществ (фаз) с образованием слоя химического соединения. Типичный пример хемосорбции — образование оксида на поверхности металла. Оксид — это и есть химическое соединение, образовавшееся на поверхности раздела двух веществ (фаз): металла (твердого тела) и воздуха (газа).

Когда два вещества связываются поверхностными слоями, их следует как-то различать. Вещество, которое накладывают сверху (чаще всего тонким слоем), называют *адгезивным веществом*. Пломбирочный материал — типичное адгезивное вещество. Вещество, на которое накладывают адгезивное вещество (имеет большую толщину), называют *субстратом*, или *основой*. Иногда используется и английский термин — «адгеренд». Пломбируемый зуб — это пример субстрата.

Различают механическую и молекулярную адгезию.

Механическая адгезия — это сильное сближение двух субстанций механическим связыванием или удержанием. Наиболее грубо — с помо-

щью крючков, петель, болтов с гайками и т. п. Пуговица на рубашке, застегиваемая в петле, — типичный пример механической адгезии. Но существуют более тонкие методы связывания адгезивного вещества с микроскопическими неровностями (порами и *кавернами* (рытвинами и впадинами)) субстрата. Вязкая жидкость или гель адгезивного вещества заполняет эти неровности, обеспечивая механическое связывание.

Этот механизм часто используют в стоматологии. Применение всевозможных клеев, адгезивных цементов, пломб основано на явлении механической адгезии.

Например, удержание золотой коронки обеспечивается механическим связыванием цементирующего агента с неровностями внутренней поверхности коронки, которая специально делается неровной.

Для механического удержания синтетических эластомеров соответствующую поверхность зуба обрабатывают фосфорной кислотой, которая способствует образованию пор на поверхности эмали. В эти поры затекает вещество эластомера, являющегося в данном случае адгезивным веществом, и закрепляется там. Аналогично осуществляется и связывание эластомера с пломбой.

Молекулярная адгезия — удержание двух веществ в связи между собой, используя притяжение молекул поверхностных слоев основы и адгезивного вещества. Технологии молекулярной адгезии являются сейчас наиболее прогрессивными, поэтому остановимся на них подробнее.

На практике оба вида адгезии наблюдаются одновременно и действуют совместно. Примером такого одновременного совместного действия является приклеивание клеем типа «Момент» каблука к башмаку.

Для склеивания необходимо проделать несколько технологических операций:

1. Обезжирить обе поверхности, т. е. убрать пыль и воду с поверхностей, а значит, подготовить поверхности к смачиванию и механической адгезии.

2. Намазать обе поверхности клеем и дать подсохнуть — произвести смачивание поверхностей каблука и подошвы клеем — это механическая адгезия (заполнение пор и неровностей поверхности клеем) и молекулярная адгезия (клей смачивает поверхность и полимеризуется).

3. Намазать склеиваемые поверхности снова и сжать, зафиксировав в тисках, струбциной или тяжестью. Это когезия (взаимодействие слоя клея на каблуке со слоем клея на подошве) на молекулярном уровне.

СВЯЗЬ АДГЕЗИИ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИЕЙ И УГЛОМ СМАЧИВАНИЯ

Поверхностная энергия адгезивного вещества и угол смачивания Θ являются характеристиками молекулярной адгезии.

Если на поверхности образуется ковалентная связь (сильная связь) между основой и адгезивным веществом, то поверхность основы покрывается *тонким* слоем адгезивного вещества. Если адгезивным веществом является газ, то это тонкий слой оксида, а явление называется *хемосорбцией*. Обычно это монослой (слой толщиной в одну молекулу), что плохо для нужд стоматологии.

Например, пленка оксида серебра на поверхности Ag не позволяет взаимодействовать с металлом клею или припою.

Если на поверхности образуются нековалентные связи между основой и адгезивным веществом, то они слабее, но их намного больше. И в этом случае поверхностная энергия адгезивного вещества достаточно велика.

Чем поверхностная энергия больше, тем сильнее «слипание» двух веществ, т. е. сильнее адгезия. Поверхностная энергия уменьшается при наличии микромусора и примесей на поверхности.

Для осуществления молекулярной адгезии совершенно необходимо, чтобы сближение поверхностей молекул двух веществ было не более 10 нм. Достигнуть этого для твердых тел тяжело, поэтому обе поверхности смачивают. Например, две хорошо отшлифованных и отполированных пластинки стекла в сухом состоянии не слипаются, но, если смочить их водой, они слипнутся отлично.

Если используемая жидкость не смачивает поверхность твердого тела, то адгезия не наблюдается, т. к. силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела малы.

Этому способствуют факторы:

1. Недостаточная чистота поверхности: пленка воды (как примеси) всего в 1 монослой на поверхности твердого тела-основы резко уменьшает поверхностную энергию основы.

2. Строение самого субстрата: некоторые органические вещества имеют плотную упаковку структурных элементов или же наличие галогенов в структуре, что приводит к понижению поверхностной энергии субстрата. Например, антипригарное свойство покрытия сковородок из материала «Тефлон» объясняется именно низкой поверхностной энергией материала, а значит невозможностью адгезии (прилипания) яичницы к нему.

Но большинство органических и неорганических жидкостей (их поверхностная энергия низка) свободно растекаются по поверхности основы с высокой поверхностной энергией.

Вывод: для хорошего адгезивного контакта должно быть хорошее смачивание. Чем больше смачивание, а значит, меньше угол смачивания Θ , тем сильнее адгезия и тем больше возможности у адгезивного материала заполнить неровности на поверхности основы.

Если же при покрытии адгезивным материалом образуются пузырьки воздуха между адгезивным веществом и субстратом (воздушные карманы) (рис. 5), то эти области потенциально являются местами разрыва адгезивных связей в результате приложенной внешней силы F . Разлом может вызывать трещину от одного пузырька к другому.

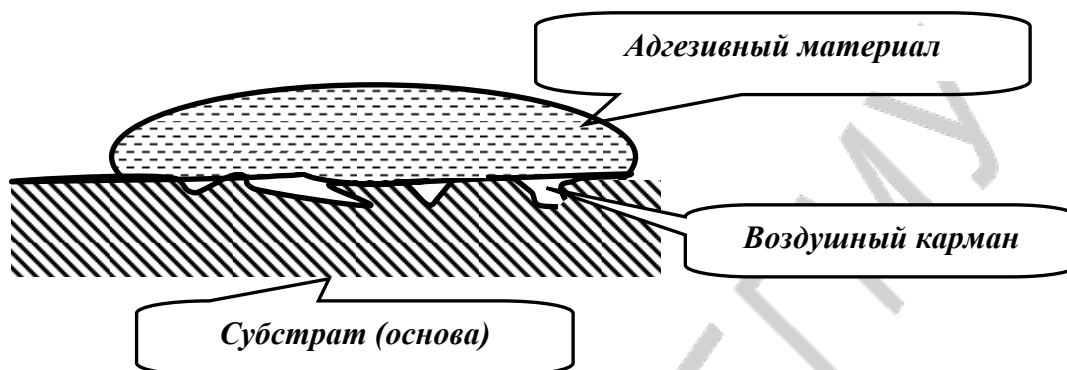


Рис. 5. Образование пузырьков воздуха (воздушных карманов) между адгезивным веществом и субстратом

ПРОЯВЛЕНИЕ АДГЕЗИИ В СТОМАТОЛОГИИ

Степень смачивания эмали и дентина падает при соприкосновении с водными растворами фтора (фториды).

Если сравнить поверхность эмали, не обработанную и обработанную фторидами, то обработанная менее подвержена кариесу и зубному камню, т. к. обладает меньшей поверхностной энергией и прилипнуть бактериям на эту поверхность труднее.

Многие стоматологические пломбировочные материалы имеют большую поверхностную энергию, чем зуб, поэтому наблюдается тенденция к тому, что поверхность и края пломбы аккумулируют бактерии и другой мусор сильнее, чем зуб.

Поэтому более частым является именно прикраевой кариес вокруг пломбы. Этим же объясняется выпадение пломбы при жевании жевательной резинки, когда пломба имеет большую поверхностную энергию, чем зуб, и прилипает к жевательной резинке сильнее, чем к внутренней поверхности полости зуба.

Недостаток адгезии между пломбой и зубом и погрешности пломбы являются причинами вторичного кариеса, продолжающейся чувствительности зуба под пломбой и осыпания (порчи) пломбы по краям.

При высверливании полости в зубе поверхность эмали и дентина покрывается зубной пылью (микрочастичками высверленного зуба). Из-за этого поверхность частично теряет свою смачиваемость. Кроме этого, используемые инструменты делают внутреннюю поверхность полости достаточно грубой и шероховатой. Эти шероховатости концентрируют сжатие,

которое испытывает пломба при жевании. Там же оказывают свое действие перепады температуры (тепловые флуктуации), которые всегда наблюдаются в ротовой полости.

Неорганические компоненты зуба имеют большое сродство к воде. Но, чтобы удалить воду из тканей зуба, пришлось бы нагреть дентин и эмаль до температур, невозможных для ротовой полости. Таким образом, зуб не получается безопасно подсушить при температуре рта с помощью приборов, инструментов и агентов, имеющихся в распоряжении дантиста.

А значит, следует иметь в виду существование как минимум монослоя воды на поверхности дентина и эмали (так называемая «проблема воды»). Этот слой воды уменьшает поверхностную энергию основы, а значит, уменьшает смачивание адгезивного пломбирочного материала.

Вывод: адгезивный материал должен вытеснять воду, взаимодействовать с ней или смачивать основу лучше, чем вода, которая уже присутствует на поверхности и внутри структуры зуба. То есть, необходима долговременная адгезия (прилипание) пломбы к поверхности зуба в водном растворе.

Кроме того, зуб сам по себе не гомогенен, а содержит органические и неорганические компоненты, причем их процентное содержание разное для дентина и эмали, т. к. их структура различна.

Поэтому современный пломбирочный материал должен хорошо связываться как с эмалью, так и с дентином даже в присутствии воды, хорошо полимеризоваться при наличии вокруг большого количества влаги.

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ФОРМУЛА ЛАПЛАСА

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Капиллярные явления — это подъем или опускание жидкости в трубках с малым диаметром — *капиллярах* (от латинского *capillus* — «волос») — по сравнению с ее уровнем в широких трубках.

Граница «жидкость–стенка сосуда» всегда прогибается вниз для смачивающей и вверх для несмачивающей жидкостей (рис. 6). Такая изогнутая поверхность называется *мениском*.

В первом случае форма мениска у стенки сосуда такая, что угол Θ между плоскостью, касательной к поверхности жидкости и стенкой острый (угол $0 < \Theta < 90^\circ$). Во втором случае угол Θ тупой (угол $90^\circ < \Theta < 180^\circ$) (жидкость как бы отходит от стенки). В капиллярах мениск жидкости при полном смачивании или несмачивании стенок трубки можно принять за полусферу, радиус которой равен радиусу канала трубки r .

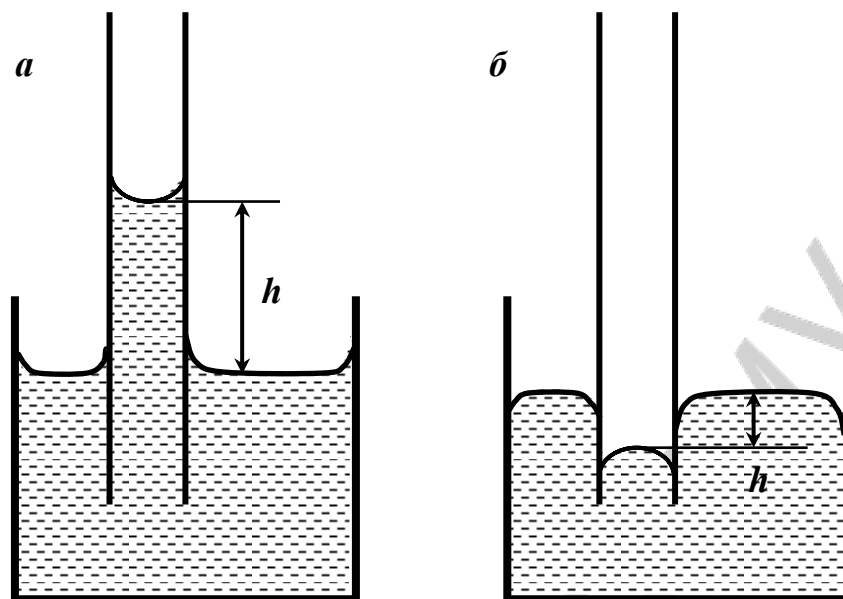


Рис. 6. Изменение поверхности жидкости на границе жидкость–стенка сосуда: *а* — граница смачивающей жидкости всегда прогибается вниз, причем в капиллярной трубке жидкость поднимается выше своего уровня в сосуде; *б* — граница несмачивающей жидкости всегда прогибается вверх, причем в капиллярной трубке жидкость опускается ниже своего уровня в сосуде

В капилляре жидкость стоит выше или ниже того уровня, на котором она должна была бы находиться по закону сообщающихся сосудов. Смачивающая жидкость (например, вода в стеклянной трубке) поднимается по капилляру. Несмачивающая жидкость (например, ртуть в стеклянной трубке) опускается в капилляре ниже уровня жидкости в широком сосуде (рис. 7).

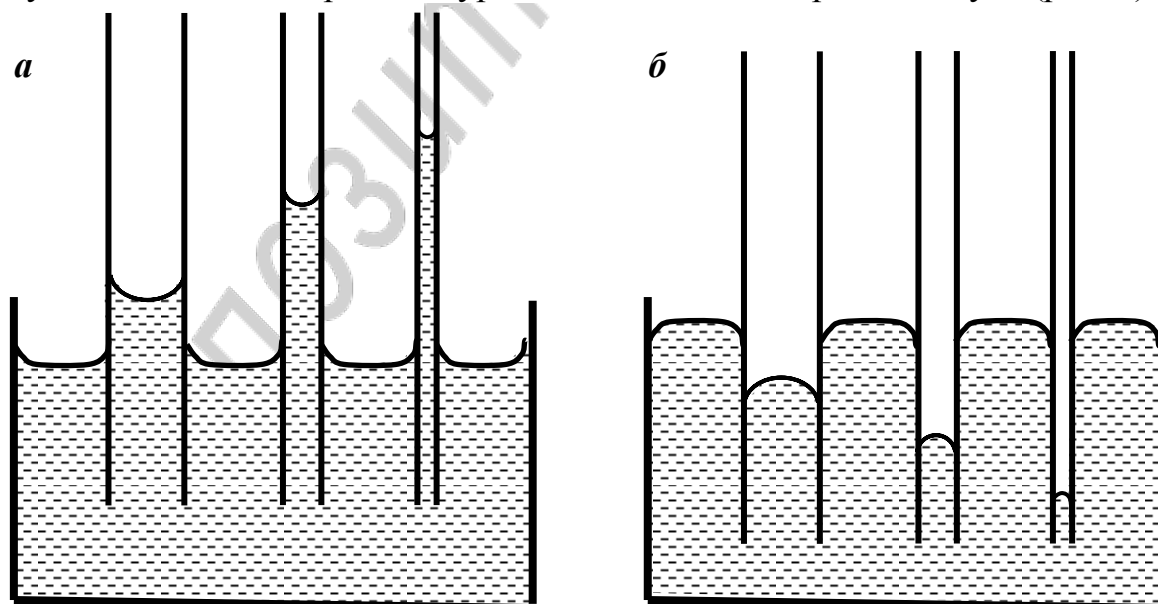


Рис. 7. Изменение уровня жидкости (зависит от диаметра капилляра):

a — поднятие уровня жидкости для смачиваемых поверхностей; *б* — опускание для несмачиваемых

При этом, чем меньше радиус трубки, тем на большую высоту она поднимается для смачивающей жидкости и опускается для несмачивающей. Во всех указанных случаях мы имеем дело с капиллярными явлениями.

ЗНАЧЕНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

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 керосинки или лампы керосин непрерывно поднимается по капиллярам вверх, где и сгорает.

Обычные кирпичи — пористые тела, они хорошо впитывают влагу. Поэтому кирпичные дома в своей нижней части должны быть изолированы от влаги.

Благодаря многочисленным капиллярам в почве вода поднимается вверх и интенсивно испаряется.

Капиллярными свойствами обладает всякое пористое тело: например, фильтровальная бумага, сухой мел, разрыхленная почва и т. д. Пористые тела легко пропитываются смачивающими жидкостями и хорошо их удерживают. Для несмачивающих жидкостей, наоборот, эти тела являются непроницаемыми. Этим объясняется, например, водонепроницаемость смазанных жиром перьев и пуха водоплавающих птиц.

Капиллярные явления определяют условия конденсации паров, кипения жидкостей, кристаллизации и т. п. Так, например, на молекулу пара над вогнутым мениском жидкости действует больше молекул жидкости и, следовательно, большая сила, чем при выпуклом мениске. Это видно из рис. 8, на котором штриховыми линиями условно показаны сферы молекулярного действия. Объем жидкости, молекулы которой притягивают выделенную молекулу пара (под мениском внутри этих сфер), для вогнутого мениска больше, чем для выпуклого.

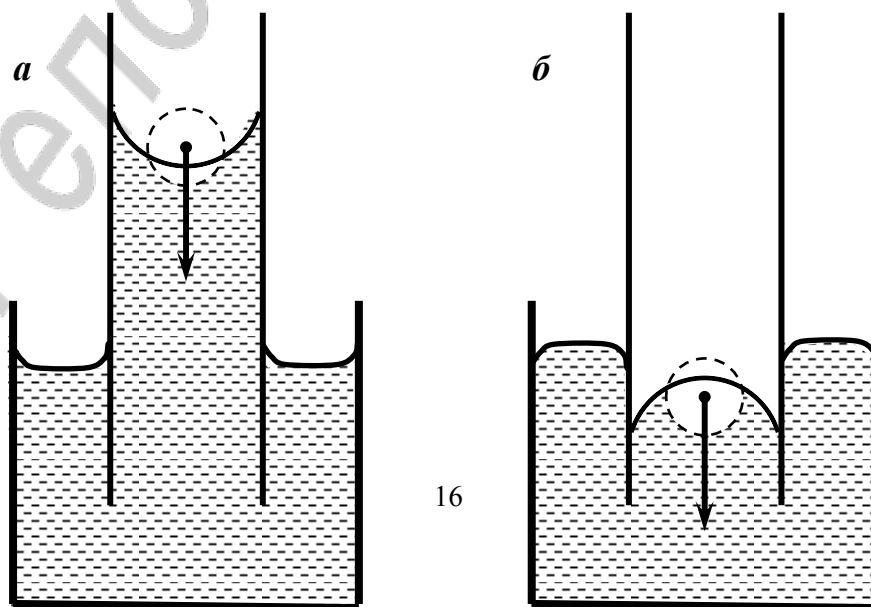


Рис. 8. Сферы молекулярного действия (указаны пунктиром):

a — жидкость смачивает стенку сосуда; b — жидкость не смачивает стенку сосуда

В результате этого возникает капиллярная конденсация в смачиваемых тонких трубках даже при сравнительно малой влажности воздуха. Благодаря этому пористые вещества могут задерживать значительное количество жидкости из паров, что приводит к увлажнению белья, ваты в сырых помещениях, затрудняет сушку гигроскопических тел, способствует удержанию влаги в почве и т. п.

Почему же мы наблюдаем:

1) что смачивающая жидкость поднимается по капилляру, а несмачивающая жидкость опускается в капилляре ниже уровня жидкости в широком сосуде;

2) чем меньше радиус трубки, тем на большую высоту она поднимается в первом случае и опускается во втором?

Ответить на эти вопросы поможет формула Лапласа, которую мы выведем.

ФОРМУЛА ЛАПЛАСА

На поверхность жидкости в капилляре действует сила поверхностного натяжения, которая будет являться равнодействующей сил, действующих на молекулы поверхностного слоя, прилегающие к стенке сосуда, для смачивающих жидкостей будет направлена наружу (вверх), а для несмачивающих — внутрь (вниз). Под действием этих сил поверхность жидкости около стенки сосуда принимает криволинейную (изогнутую) форму, называемую мениском. Мениск будет вогнутым, если жидкость смачивает стенку сосуда (рис. 8а) и выпуклым, если не смачивает (рис. 8б).

Вывод формулы (факультативно). По определению коэффициента поверхностного натяжения $\sigma = \frac{\Delta A}{\Delta S}$ можно определить давление внутри шарообразной капли жидкости или давление внутри *пузырька газа* в жидкости.

Если p — давление внутри шарообразной капли жидкости или внутри пузырька газа, σ — поверхностное натяжение жидкости, r — радиус шарика, то для увеличения радиуса r шарика на величину Δr ($r_1 = r + \Delta r$) (рис. 9а) или увеличения площади его поверхности S на ΔS надо затратить работу, равную приращению поверхностной энергии: $\Delta W = \Delta A = \sigma \Delta S$, где площадь шара (вспомним из школьного курса геометрии) равна $S = 4\pi r^2$.

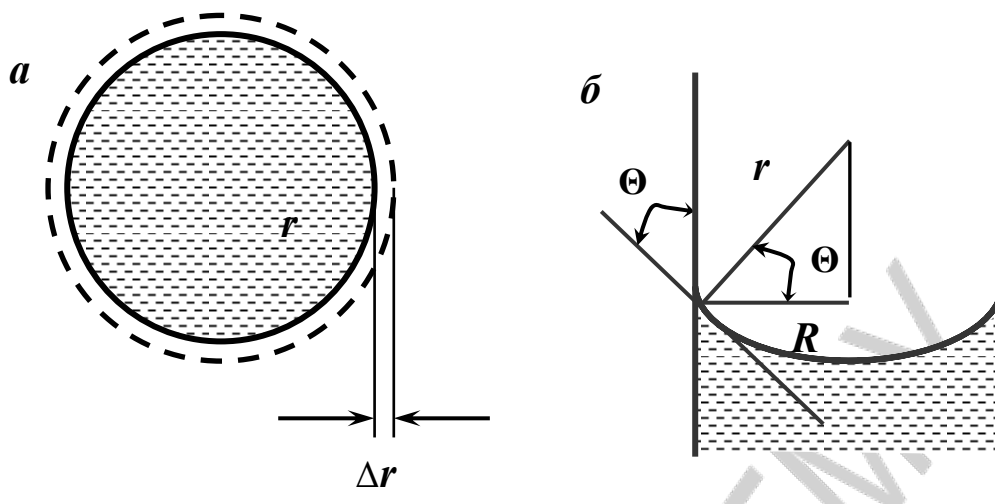


Рис. 9. Поясняющие рисунки при выводе формулы Лапласа: а — сфера, изменяющая свой радиус на Δr (вывод формулы Лапласа); б — связь между радиусом мениска r и радиусом капилляра R

Тогда $\Delta A = \sigma \Delta S = \sigma [4\pi r_1^2 - 4\pi r^2] = \sigma [4\pi(r + \Delta r)^2 - 4\pi r^2]$,
а значит: $\Delta A = 4\pi\sigma [(r + \Delta r)^2 - r^2]$.

Квадрат суммы, как известно, равен $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$, то
 $\Delta A = 4\pi\sigma [(r + \Delta r)^2 - r^2] = 4\pi\sigma [r^2 + 2r\Delta r + (\Delta r)^2 - r^2] = 4\pi\sigma [r^2 + 2r\Delta r + (\Delta r)^2 - r^2] =$
 $= 4\pi\sigma [2r\Delta r + (\Delta r)^2] = 4\pi\sigma [2r\Delta r + (\Delta r)^2]$.

Поскольку $(\Delta r)^2 \ll 2r\Delta r$, то членом, содержащим $(\Delta r)^2$, можно пренебречь. Поэтому для изменения работы мы имеем: $\Delta A = \sigma 8\pi r \Delta r$.

С другой стороны, затраченная работа газа при постоянной температуре равна: $\Delta A = p\Delta V$, где изменение объема шара как дифференциал функции равно

$$\Delta V = V' \Delta r = \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)' \Delta r = 4\pi r^2 \Delta r.$$

Тогда $\Delta A = p\Delta V = p4\pi r^2 \Delta r$. Приравнявая оба выражения, получим:
 $\Delta A = \sigma 8\pi r \Delta r = p4\pi r^2 \Delta r$.

В итоге получим: $\sigma 2 = pr$, что можно преобразовать так: $\Delta p = \frac{2\sigma}{r}$.

Эта формула называется формулой Лапласа для дополнительного давления под изогнутой поверхностью жидкости.

Формула Лапласа читается так: дополнительное давление под изогнутой поверхностью жидкости вследствие действия сил поверхностного натяжения прямо пропорционально коэффициенту поверхностного натяжения σ , обратно пропорционально радиусу r капли жидкости или пузырька газа в жидкости и направлено в сторону вогнутости (к центру кривизны).

Отметим, что поскольку давление обратно пропорционально радиусу капли жидкости или пузырька газа в жидкости, **давление тем больше, чем меньше радиус шарообразной капли.**

Формула Лапласа выполняется и для капиллярных явлений.

Под действием сил поверхностного натяжения поверхностный слой жидкости искривлен, образуя мениск, и оказывает дополнительное по от-

ношению к внешнему давлению Δp . В капилляре внешним давлением является атмосферное давление (гидростатическое давление столба атмосферы, находящейся над нами), обусловленное силой тяжести и равное на поверхности моря 760 мм рт. ст. или $1,0135 \cdot 10^5$ Па.

Результирующая сила поверхностного натяжения искривленной поверхности направлена в сторону вогнутости (к центру кривизны). В случае сферической поверхности, радиус кривизны которой r , дополнительное давление по формуле Лапласа: $\Delta p = \frac{2\gamma}{r}$.

При хорошем смачивании образуется вогнутый мениск. Силы дополнительного давления Лапласа направлены от жидкости наружу, т. е. вверх.

Дополнительное давление Лапласа действует против атмосферного давления, уменьшая его, обуславливая подъем жидкости в капилляре.

Жидкость будет подниматься в капилляре до тех пор, пока дополнительное давление Δp (давление Лапласа), обусловленное силами поверхностного натяжения и направленное вверх (к центру окружности мениска), не уравновесится гидростатическим (весовым) давлением $p_{\text{гидрост}} = \rho gh$, действующим вниз ($\Delta p = p_{\text{гидрост}}$).

Но радиус мениска равен радиусу капилляра ($R = r$) только при полном смачивании, когда $\Theta = 0^\circ$. Во всех других случаях найти радиус мениска экспериментально непросто, поэтому выразим r через R — радиус капилляра. Из рис. 9б видно, что $r = \frac{R}{\cos \Theta}$.

Поэтому, учитывая закон Лапласа, получаем равенство:

$\rho gh = \frac{2\sigma \cos \Theta}{R}$, откуда высота поднятия жидкости в капилляре

$h = \frac{2\sigma \cos \Theta}{\rho g R}$ (*), т. е. зависит от свойств жидкости и материала капилляра,

а также от его радиуса.

В случае плохого смачивания (несмачивания) $\cos \Theta < 0$ и формула (*) **покажет высоту опускания жидкости** в капилляре.

Эта же формула дает возможность определить поверхностное натяжение жидкости по высоте подъема жидкости в капилляре и величине краевого угла между мениском жидкости и стенками сосуда (**капиллярный метод**):

$$\sigma = \frac{\rho g R h}{2 \cos \Theta}$$

В случае полного смачивания (угол $\Theta = 0^\circ$, а значит $\cos \Theta = 1$) и полного несмачивания (угол $\Theta = 180^\circ$, а значит $\cos \Theta = -1$) формула намного упростится.

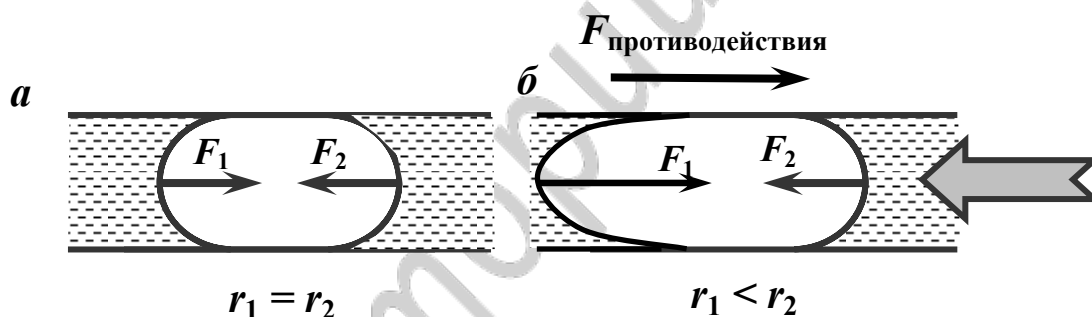
Существуют и другие методы определения коэффициента поверхностного натяжения σ : а) метод отрыва капель; б) методы отрыва кольца и рамки; в) метод отрывающегося пузырька воздуха (Ребиндера). Они будут рассмотрены ниже.

ГАЗОВАЯ ЭМБОЛИЯ

Рассмотрим поведение пузырька воздуха, находящегося в капилляре с жидкостью. Если давление жидкости на пузырек с разных сторон одинаково, то оба мениска пузырька будут иметь одинаковый радиус кривизны, и силы дополнительного давления будут уравнивать друг друга $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ (рис. 10а).

При избыточном давлении с одной из сторон, например, при движении *жидкости*, мениски деформируются, изменятся их радиусы кривизны (рис. 10б).

Дополнительное давление Δp (давление Лапласа) с разных сторон



станет неодинаковым: для мениска с радиусом r_1 $\Delta p_1 = \frac{2\sigma}{r_1}$, а для мениска

с радиусом r_2 $\Delta p_2 = \frac{2\sigma}{r_2}$. Поскольку $r_1 < r_2$, то дополнительное давление

Δp_1 , будучи больше, чем Δp_2 , будет препятствовать току жидкости, т. е. затруднит или прекратит движение жидкости. Пузырек закупорит сосуд и нарушит кровоснабжение.

Рис. 10. Пузырек воздуха в кровеносном сосуде:

а — если давление жидкости на пузырек с разных сторон одинаковое, то мениски имеют одинаковый радиус, а значит, и силы дополнительного давления уравнивают друг друга ($F_1 = F_2$) (стрелочки одинаковые по длине); б — при избыточном давлении жидкости на пузырек с одной стороны (на рисунке справа) мениски деформируются, и их радиусы уже не равны. При этом силы дополнительного давления уже не уравнивают друг друга ($F_1 > F_2$). Появляется сила, препятствующая движению жидкости, равная $F_{\text{противодействия}} = F_1 - F_2$

Такие явления могут происходить в кровеносной системе человека, особенно в местах разветвления кровеносных сосудов (рис. 11).

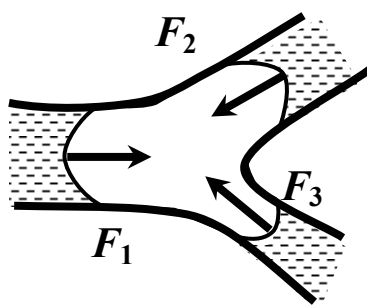


Рис. 11. В месте разветвления кровеносных сосудов векторная сумма сил F_1 , F_2 и F_3 может быть равна нулю. Тогда пузырек воздуха, попавший в кровь, может закупорить место разветвления и вызвать газовую эмболию

Таким образом, попавшие в кровь пузырьки воздуха могут закупорить мелкий сосуд и лишит кровоснабжения какой-либо орган. Это явление, называемое *газовой эмболией*, может привести к серьезному функциональному расстройству или даже летальному исходу.

Так, воздушная газовая эмболия может возникнуть при ранении крупных вен: проникший в ток крови воздух образует воздушный пузырь, препятствующий прохождению крови. Пузырьки воздуха также не должны попадать в вены при внутривенных вливаниях.

Газовые пузырьки азота в крови могут появиться у водолазов при быстром подъеме с большой глубины на поверхность, у летчиков и космонавтов при разгерметизации кабины или скафандра на большой высоте. Это обусловлено переходом газов крови из растворенного состояния в газообразное в результате понижения окружающего атмосферного давления. Ведущая роль в образовании газовых пузырьков при уменьшении давления принадлежит азоту N_2 , так как он обуславливает основную часть общего давления газов в крови и не участвует в газообмене организма и окружающего воздуха.

РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЛЕГОЧНОГО 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.

Но поверхностное натяжение $\sigma_{\text{альв}}$ 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 $\sigma_{\text{альв}}$ зависит от толщины пленки d , их выстилающей. При дыхании толщина пленки меняется: на вдохе она становится тоньше (растягивается) и тогда $\sigma_{\text{альв}} = 50 \cdot 10^{-2}$ Н/м, а на выдохе становится толще (сжимается) и $\sigma_{\text{альв}} = (5 - 10) \cdot 10^{-2}$ 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 $\sigma_{\text{альв}}$ 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** (холинфосфолипиды) — 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.

Согласно формуле Лапласа $\Delta p = \frac{2\gamma}{r}$ 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 $\sigma_{\text{сурф}}$ в них. Таким образом, сурфактанты препятствуют полному схлопыванию мелких альвеол.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

МЕТОД ОТРЫВА КАПЕЛЬ

Метод *отрыва капель* основан на том, что при образовании капель жидкости, вытекающей из узкой вертикально расположенной трубки внутреннего радиуса r , отрыв капли происходит в момент, когда ее сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ преодолевает силу $\vec{F}_{\text{пов}}$ поверхностного натяжения, действующую по периметру шейки капли (рис. 12а).

Считаем радиус шейки капли равным внутреннему радиусу r трубки. В момент отрыва наблюдается неустойчивое равновесие, т. е. сумма всех сил, действующих на каплю, равна 0. Так как сил всего две, то тогда по модулю $F_{\text{тяж}} = F_{\text{пов}}$ (рис. 12б). По определению коэффициента поверхностного натяжения $\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$, где l — длина поверхности капли, соприкасающейся с трубкой и равна длине окружности $l = 2\pi r$, а значит, $F_{\text{пов}} = \sigma l = \sigma 2\pi r$. Отсюда $\sigma = \frac{F_{\text{тяж}}}{2\pi r}$.

Как известно, сила тяжести равна $F_{\text{тяж}} = mg$, где g — ускорение свободного падения, а m — масса капли. Масса капли равна $m = \rho V$, где ρ — плотность жидкости, а V — объем капли.

$$\text{Тогда } \sigma = \frac{\rho V g}{2\pi r}.$$

Объем V одной капли мал и определить его непросто, поэтому обычно считается число капель n (порядка 30–100) и определяется объем этого количества капель V_n (уже достаточно большой). Понятно, что объем одной капли $V = \frac{V_n}{n}$. Отсюда $\sigma = \frac{\rho V_n g}{2\pi r n}$.

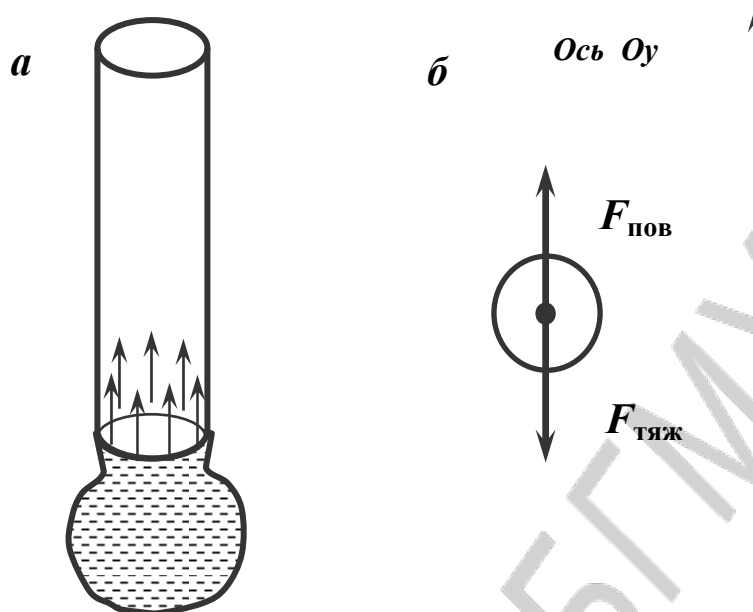


Рис. 12. Метод отрыва капли от кончика капилляра:

a — вдоль окружности шейки капилляра действует сила поверхностного натяжения (указана в виде тонких стрелочек); *б* — в момент отрыва капли наблюдается неустойчивое равновесие, т. е. сила тяжести и сила поверхностного натяжения равны по модулю и противоположны по направлению

Сначала трубка наполняется контрольной жидкостью (водой) с плотностью ρ_0 и считается число капель n_0 , образующих при вытекании из трубки в стакан объем V_{n0} .

$$\text{Тогда } \sigma_0 = \frac{\rho_0 V_{n0} g}{2\pi r n_0}.$$

Затем трубка наполняется исследуемой жидкостью с плотностью ρ_1 и считается число капель n_1 , образующих при вытекании объем V_{n1} .

$$\text{В этом случае } \sigma_1 = \frac{\rho_1 V_{n1} g}{2\pi r n_1}.$$

$$\text{Разделив } \sigma_1 \text{ на } \sigma_0, \text{ получаем: } \frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{\rho_1 V_{n1} n_0}{\rho_0 V_{n0} n_1}.$$

Если количество капель мы отсчитываем в обоих случаях одинаковое ($n_0 = n_1$), то формула упростится так: $\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{\rho_1 V_{n1}}{\rho_0 V_{n0}}$.

Тогда коэффициент поверхностного натяжения неизвестной жидкости будет равен: $\sigma_1 = \sigma_0 \frac{\rho_1 V_{n1}}{\rho_0 V_{n0}}$.

Если мы задались целью накапать одинаковый объем обеих жидкостей ($V_{n0} = V_{n1}$), то формула упростится, но по-другому: $\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{\rho_1 n_0}{\rho_0 n_1}$.

В этом случае коэффициент поверхностного натяжения неизвестной жидкости равен $Y_1 = Y_0 \frac{c_1 n_0}{c_0 n_1}$.

Коэффициент поверхностного натяжения воды σ_0 при данной температуре берется из табл. 1.

МЕТОДЫ ОТРЫВА КОЛЬЦА И РАМКИ

В этих методах на поверхность исследуемой жидкости осторожно кладут конструкцию торцевой поверхностью: кольцо его плоской поверхностью (рис. 13а) или квадратную проволочную рамку с длиной стороны a и толщиной проволоки b вертикально, чтобы с жидкостью соприкасалась одна сторона проволочного квадрата (рис. 13б).

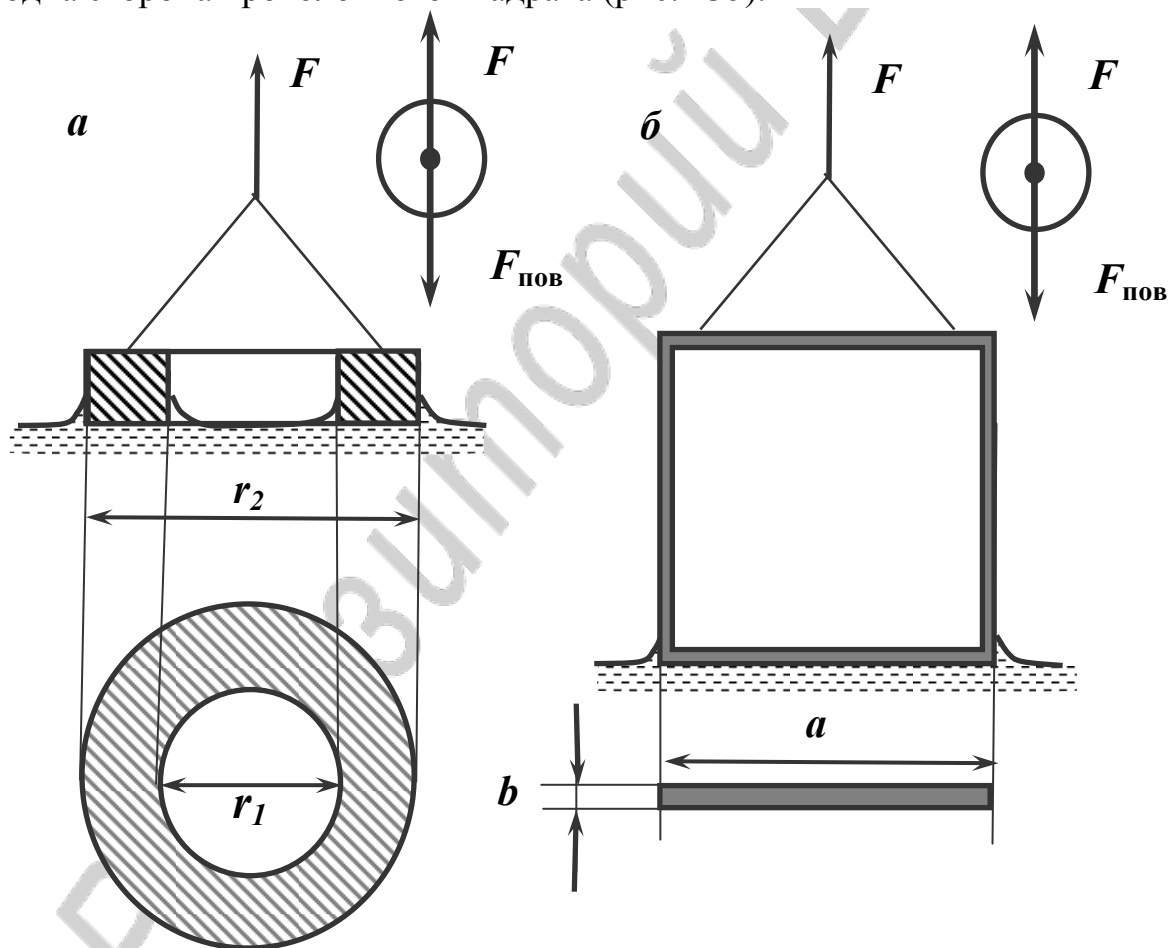


Рис. 13. Методы отрыва от поверхности жидкости: а — кольца; б — рамки

Оба эти метода основаны на прямом измерении с помощью динамометра или торсионных весов внешней силы $F_{\text{внеш}}$, необходимой для отрыва конструкции, касающейся торцом поверхности жидкости в стаканчике и удерживаемой силой поверхностного натяжения $F_{\text{пов}}$. В момент отрыва

торца конструкции от поверхности исследуемой жидкости сила $F_{\text{внеш}}$, показываемая динамометром, будет равна по модулю силе поверхностного натяжения $F_{\text{пов}}$ для данной жидкости.

По определению $\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$, где l — длина поверхности отрываемой конструкции, соприкасающейся с жидкостью (длина торца).

Для метода *отрыва кольца* сила $F_{\text{пов}}$ действует на кольцо по внешнему периметру радиусом r_2 и внутреннему — радиусом r_1 , а значит длина поверхности торца равна $l = 2\pi r_1 + 2\pi r_2$.

Поэтому поверхностное натяжение будет равно: $\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{2\pi(r_1 + r_2)}$.

Для метода *отрыва рамки* торцевой поверхностью является прямоугольник со сторонами a и b , причем b — толщина проволоки, из которой сделана рамка, и этой толщиной можно пренебречь, т. к. проволока тонкая. Тогда длина поверхности торца, на которую действует сила $F_{\text{пов}}$, равна $l = 2a + 2b \approx 2a$. Поверхностное натяжение для этого случая будет равно

$$\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{2a}.$$

МЕТОД РЕБИДЕРА

Этот метод также часто называют методом отрыва пузырьков на кончике капилляра в пробирке. Исследуемая жидкость помещается в пробирку **1** (рис. 14), в которую затем вертикально опускается капиллярная трубка **2**, вмонтированная в пробку, узкий конец которой диаметром не больше 0,5 мм касается мениска исследуемой жидкости.

Другим концом эта трубка сообщается с атмосферным воздухом, в то время как исследуемая жидкость — нет (из-за наличия плотно пригнутой к поверхности пробирки пробки).

В стеклянном сосуде **3** с краном **4** находится вода. Сосуд закрыт плотно пригнутой пробкой, причем *давление над поверхностью воды в сосуде p_1* такое же, как над поверхностью исследуемой жидкости и в левом столбике манометра **5**.

При открытом кране **4** из сосуда **3** начинает вытекать вода. Объем воды в сосуде **3** уменьшается, а значит, объем воздуха над водой в сосуде увеличивается. Температура воздуха остается неизменной, масса воздуха тоже не меняется, из чего следует, что *выполняется закон Бойля и Мариотта: для газа одинаковой массы при постоянной температуре произведение давления на объем постоянной*, т. е. $pV = \text{const}$ или $p_1V_1 = p_2V_2$. При увеличении объема воздуха над водой в сосуде **3** давление p_1 понижается, а значит, оно понизится и над исследуемой жидкостью, и в левом столбике манометра.

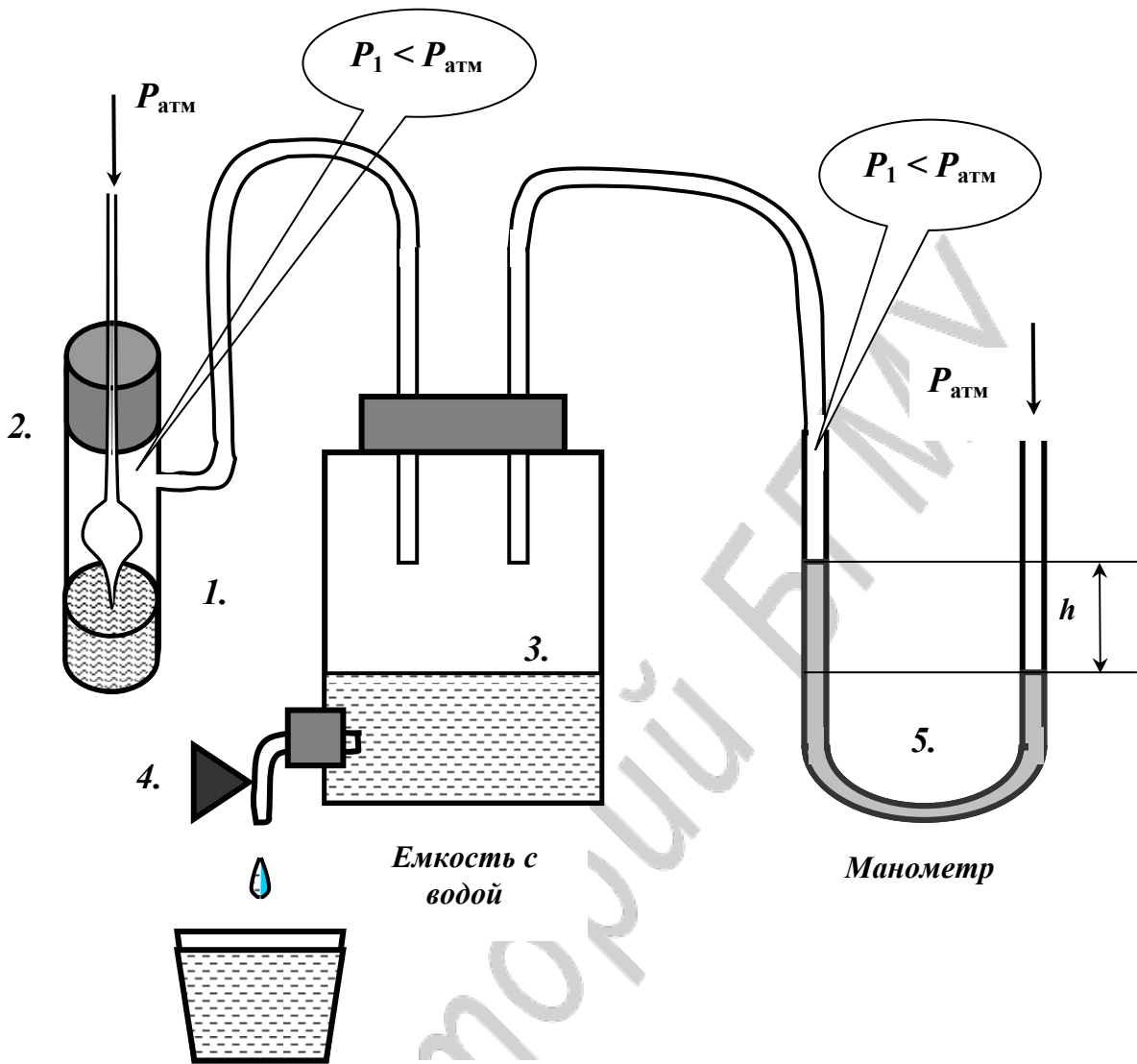


Рис. 14. Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения методом Ребиндера:

1 — пробирка с исследуемой жидкостью; 2 — капиллярная трубка, узким концом чуть опущенная в жидкость; 3 — сосуд с водой, плотно закрытый пробкой; 4 — кран для слива воды; 5 — U-образный жидкостный манометр

При некотором давлении p_1 над поверхностью исследуемой жидкости из конца капиллярной трубки 2 под действием разности атмосферного давления $p_{\text{атм}}$ и давления p_1 выдавливается в жидкость воздушный пузырек. Разность давлений $\Delta p = p_{\text{атм}} - p_1$, измеряемая манометром, равна ρgh , где ρ — плотность жидкости, залитой в манометр, h — разность уровней этой жидкости в левом и правом столбике U-образной трубки манометра.

Разность давлений уравнивается давлением $p_{\text{доп}}$, обусловленным поверхностным натяжением исследуемой жидкости в пробирке 1. Тогда давление, возникающее под действием сил поверхностного натяжения, равно разности давлений, измеряемой манометром 5: $p_{\text{доп}} = \Delta p$.

По формуле Лапласа давление, обусловленное силами поверхностного натяжения, равно $p_{\text{доп}} = \frac{2\sigma}{r}$, где r — радиус мениска.

Для капилляра будем считать этот радиус приблизительно равным радиусу капилляра: $r \approx R$.

Разность давлений $\Delta p = \rho gh$ таким образом равна $p_{\text{доп}}$:

$$\rho gh = \frac{2\sigma}{r} \quad (1).$$

Для эталонной жидкости, например дистиллированной воды, коэффициент поверхностного натяжения σ_0 известен, поэтому можно записать данную формулу так:

$$\rho gh = \frac{2\sigma}{R} \quad (2),$$

где h_0 — разность уровней жидкости плотностью ρ в левом и правом столбике U-образной трубки манометра при отрывании пузырька в пробирке с водой в качестве исследуемой жидкости.

Для неизвестной исследуемой жидкости с поверхностным натяжением σ_1 уравнение выглядит так:

$$\rho gh_1 = \frac{2\sigma_1}{R} \quad (3).$$

Разделив уравнение (3) на (2), получим: $\frac{h_1}{h_0} = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}$.

Выразив из этой формулы σ_1 , мы получим выражение для определения поверхностного натяжения любой исследуемой жидкости: $\sigma_1 = \sigma_0 \frac{h_1}{h_0}$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ РАСТВОРА СПИРТА
РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТОДОМ РЕБИНДЕРА»

Основная идея: пользуясь вышеописанной лабораторной установкой (рис. 1), найти коэффициент поверхностного натяжения розовой и голубой жидкостей и, зная, что это растворы спирта в воде, определить какой из них более разбавлен водой. Для этого следует измерить несколько раз разность высот в левом и правом столбике U-образной трубки манометра при нахождении в пробирке **1** поочередно воды (эталонная жидкость), розовой и голубой жидкостей.

Порядок выполнения

1. Налить достаточно (порядка $\frac{2}{3}$ объема) воды в сосуд **3** при закрытом кране **4** и плотно закрыть сосуд пробкой.

2. Налить в пробирку **1** любую из исследуемых жидкостей (воду (эталонная жидкость), розовый или голубой раствор спирта) так, чтобы опускаемая в пробирку капиллярная трубка **2**, вмонтированная в пробку, своим узким концом была опущена ниже поверхности (мениска) исследуемой жидкости не более чем на 3 мм. Плотно закрыть пробку капиллярной трубки.

3. Открыть кран **4** сосуда **3**, чтобы вода вытекала каплями или максимально тонкой струйкой. При этом разность уровней жидкости в левом и правом столбике U-образной трубки манометра будет увеличиваться, а на кончике капиллярной трубки **2** будет набухать пузырек воздуха.

4. В момент отрыва пузырька разность уровней жидкости в левом и правом столбике U-образной трубки манометра **h** будет максимальна. Следует зафиксировать **h** и записать в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментально полученные данные для разности уровней h
в левом и правом столбике U-образной трубки манометра для воды (h_0),
розового $h_{роз}$ и голубого $h_{гол}$ растворов спирта

Опыт №	h_0 , мм	$h_{роз}$, мм	$h_{гол}$, мм
1			
2			
3			
4			
Среднее			
σ , мН/м	72		

5. Повторить определение **h** для каждой из исследуемых жидкостей по несколько раз и занести измерения в таблицу. Следить за тем, чтобы воды в сосуде **3** было достаточно (не менее $\frac{1}{3}$ объема), и подливать

ее по мере вытекания, не забывая плотно закрывать затем сосуд пробкой (иначе в сосуде будет не давление p_1 , а атмосферное давление $p_{\text{атм}}$, и пузырьки выделяться не будут).

6. Найти средние арифметические $h_{\text{сред}}$ разности высот для каждой из жидкостей.

7. Посчитать значение коэффициентов поверхностного натяжения розовой и голубой жидкости (соответственно $\sigma_{\text{роз}}$ и $\sigma_{\text{гол}}$) и тоже внести в таблицу. Следует использовать формулу $\sigma_1 = \sigma_0 h_1 / h_0$, где σ_0 — коэффициент поверхностного натяжения эталонной жидкости (дистиллированной воды), который известен ($\sigma_0 = 72 \text{ мН/м} = 72 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ при $+20 \text{ }^\circ\text{C}$), h_0 — средняя разность уровней жидкости в левом и правом столбике U-образной трубки манометра при отрывании пузырька в пробирке с водой в качестве исследуемой жидкости ($h_0 = h_{0\text{сред}}$), h_1 — средняя разность уровней раствора спирта в воде (розовой или голубой жидкости).

8. Сравнить полученные значения $\sigma_{\text{роз}}$ и $\sigma_{\text{гол}}$ с коэффициентами поверхностного натяжения воды и спирта ($\sigma_{\text{спирта}} = 22 \text{ мН/м} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ при $+20 \text{ }^\circ\text{C}$) и сделать вывод о том, какой из растворов (розовый или голубой) является спиртом, более разбавленным водой.

Чем больше разбавление водой, тем дальше σ от поверхностного натяжения спирта $\sigma_{\text{спирта}}$ и ближе к поверхностному натяжению воды $\sigma_{\text{воды}}$. **У раствора спирта при разбавлении водой коэффициент поверхностного натяжения увеличивается.** Это и есть главный вывод из данной лабораторной работы.

ЗАДАЧИ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

1. Почему трудно снять с руки мокрую перчатку?

2. В капилляре диаметром 2,8 мм, погруженном в воду перпендикулярно ее поверхности, вода поднялась на высоту 1 см. Определите по этим данным коэффициент поверхностного натяжения. Ускорение свободного падения $9,8 \text{ м/с}^2$, плотность воды 10^3 кг/м^3 . (Ответ: $\sigma = 68,6 \text{ мН/м}$).

3. При температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$ коэффициент поверхностного натяжения на границе «вода–воздух» равен $75,6 \text{ мН/м}$, а при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ — $72,6 \text{ мН/м}$. На сколько процентов изменится масса капли, падающей из капилляра при изменении температуры от $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\left(\frac{m_{\text{кон}} - m_{\text{нач}}}{m_{\text{нач}}} 100\% \right)$?

Таким образом, следует найти $\frac{\Delta m}{m_{\text{нач}}} 100\%$, т. е. для данного случая

$$\frac{m_{20} - m_0}{m_0} 100\%. \text{ (Ответ: увеличится на } 4\% \text{).}$$

4. Пузырек воздуха, попавший в кровеносный сосуд, имеет радиусы кривизны 0,2 и 0,6 мм. Определить добавочное давление в пузырьке, препятствующее кровотоку. Ответ перевести в Паскали и мм рт. ст. Коэффициент поверхностного натяжения на границе «кровь–воздух» 58 мН/м. (Ответ: $p = 386,7 \text{ Па} = 2,9 \text{ мм рт. ст.}$).

5. Спирт поднялся по капиллярной трубке на высоту 55 мм, а вода — на высоту 146 мм. Определить плотность спирта, считая капилляр достаточно узким (радиус мениска равен радиусу капилляра). Коэффициенты поверхностного натяжения спирта и воды даны выше. (Ответ: $\rho = 811 \text{ кг/м}^3$).

6. Длинную капиллярную трубку радиусом 0,8 мм заполнили водой и перевели в вертикальное положение. Найти массу жидкости, оставшейся в трубке после того, как часть воды вылилась. (Ответ: $m = 3,69 \text{ кг}$).

7. Из трубки диаметром 1,6 мм капает этиловый спирт. Сколько капель приходится на 1 г спирта? Диаметр шейки капли в момент отрыва считать равным диаметру трубки. (Ответ: $n = 88 \text{ капель}$).

8. Вертикальная капиллярная трубка радиусом $r = 10^{-4} \text{ м}$ погружена в ртуть. Считая, что ртуть абсолютно не смачивает материала трубки, определить давление ртути в капилляре непосредственно под выпуклой (полусферической) поверхностью жидкости. Давление атмосферы не учитывать. Коэффициент поверхностного натяжения ртути 0,465 Н/м. (Ответ: $p = 9,5 \text{ кПа}$).

9. Какого диаметра должен быть кончик трубки капельницы, чтобы при дозировке дистиллированной воды масса каждой капли равнялась 40 мг? (Ответ: $D = 1,73 \text{ мм}$).

10. В кровеносном сосуде образовался пузырек воздуха. В результате течения крови пузырек воздуха деформировался, образовав поверхности с радиусами кривизны 0,1 и 0,5 мм. Определить дополнительное давление в сосуде, возникающее в результате деформации пузырька воздуха. (Ответ: $p = 928 \text{ Па}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов, А. П. Сборник задач и вопросов по медицинской физике / А. П. Баранов, Г. М. Рогачев. Минск : Вышэйшая школа, 1982. 190 с.
2. Буховцев, Б. Б. Физика : учеб. пособие для 9 класса средней школы / Б. Б. Буховцев, Ю. Л. Климонтович, Г. Я. Мякишев. М. : Просвещение, 1980. 254 с.
3. Горский, Ф. К. Физический практикум с элементами электроники (для медицинских институтов) / Ф. К. Горский, Н. М. Сакевич. Минск : Вышэйшая школа, 1980. 272 с.
4. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. М. : Мир, 1985. 519 с.
5. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. 1 / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. М. : Наука, 1988. 215 с.
6. Ливенцев, Н. М. Курс физики для медвузов / Н. М. Ливенцев. М. : Высшая школа, 1974. 646 с.
7. Ремизов, А. Н. Учебник по медицинской и биологической физике / А. Н. Ремизов, А. Г. Максина, А. Я. Потапенко. М. : Дрофа, 2003. 560 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Почему это важно для медиков.....	3
Поверхностное натяжение.....	4
Природа сил поверхностного натяжения.....	4
Смачивание и несмачивание.....	7
Явление смачивания и его характеристики.....	7
Явление адгезии.....	10
Виды адгезии.....	10
Связь адгезии с поверхностной энергией и углом смачивания.....	11
Проявление адгезии в стоматологии.....	13
Капиллярные явления. Формула Лапласа.....	14
Капиллярные явления.....	14
Значение капиллярных явлений.....	15
Формула Лапласа.....	17
Газовая эмболия.....	19
Роль поверхностного натяжения легочного сурфактанта в процессе дыхания.....	21
Методы определения коэффициента поверхностного натяжения.....	22
Метод отрыва капель.....	22
Методы отрыва кольца и рамки.....	24
Метод Ребиндера.....	25
Лабораторная работа.....	28
Задачи на поверхностное натяжение.....	29
Литература.....	30

Учебное издание

Крылов Андрей Борисович

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ЯВЛЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск А. Б. Крылов
Редактор О. В. Иванова
Компьютерная верстка Н. М. Федорцовой

Подписано в печать 29.11.07. Формат 60×84/16. Бумага писчая «КюмЛюкс».

Печать офсетная. Гарнитура «Times».

Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,54. Тираж 100 экз. Заказ 88.

Издатель и полиграфическое исполнение –

Белорусский государственный медицинский университет.

ЛИ № 02330/0133420 от 14.10.2004; ЛП № 02330/0131503 от 27.08.2004.

220030, г. Минск, Ленинградская, 6.