

Краевая научно-практическая конференция
учебно-исследовательских работ учащихся 6-11 классов
«Прикладные и фундаментальные вопросы математики»

Изучение капиллярных явлений

Галушина Татьяна Олеговна
11 класс, МБОУ «Лицей №1», г.Пермь

Саввина Марина Витальевна
Учитель физики высшей категории
МБОУ «Лицей №1», г.Пермь

Пермь. 2016.

Введение

В повседневной жизни каждому человеку приходится иметь дело с телами, пронизанными множеством мелких каналов. Такую структуру имеют бумага, пряжа, кожа, ткань, различные строительные материалы, грунт, дерево и многое другое. Приходя в соприкосновение с водой и другими жидкостями, такие тела очень часто впитывают в себя жидкость. На этом основано действие полотенца, фитиля в лампе, питание растений. Подобные явления можно также наблюдать в очень узких трубочках, которые называются капиллярами (от лат. *capillar* – волосяной). Происходящее носит название явления капиллярности.

Капиллярность – явление подъёма или опускания жидкости в капиллярах, заключающееся в способности жидкостей изменять уровень в трубках малого диаметра, узких каналах произвольной формы и пористых телах.

Для подробного изучения данного явления для начала стоит детально рассмотреть силы, лежащие в основе капиллярности.

Поверхностное натяжение

Сам термин «поверхностное натяжение» подразумевает, что вещество у поверхности находится в «натянutom», то есть напряжённом состоянии, которое объясняется действием силы, называемой внутренним давлением. Она стягивает молекулы внутрь жидкости в направлении, перпендикулярном её поверхности. Так, молекулы, находящиеся во внутренних слоях вещества, испытывают в среднем одинаковое по всем направлениям притяжение со стороны окружающих молекул; молекулы же поверхностного слоя подвергаются неодинаковому притяжению со стороны внутренних слоёв веществ и со стороны, граничащей с поверхностным слоем среды. Например, на поверхности раздела жидкость – воздух молекулы жидкости, находящиеся в поверхностном слое, сильнее притягиваются со стороны соседних молекул внутренних слоёв жидкости, чем со стороны молекул воздуха. Это и является причиной различия свойств поверхностного слоя жидкости от свойств её внутренних объёмов.

Внутреннее давление обуславливает втягивание молекул, расположенных на поверхности жидкости, внутрь и тем самым стремится уменьшить поверхность до минимальной при данных условиях. Сила, действующая на единицу длины границы раздела, обуславливающая сокращение поверхности жидкости, называется силой поверхностного натяжения или просто поверхностным натяжением σ .

Поверхностное натяжение различных жидкостей неодинаково, оно зависит от их молярного объёма, полярности молекул, способности молекул к образованию водородной связи между собой и др.

При увеличении температуры поверхностное натяжение уменьшается по линейному закону. На поверхностное натяжение жидкости оказывают влияние и находящиеся в ней примеси. Вещества, ослабляющие поверхностное натяжение, называют поверхностно-активными (ПАВ). По отношению к воде ПАВ являются нефтепродукты, спирты, эфир, мыло и др. жидкие и твёрдые вещества. Некоторые вещества увеличивают поверхностное натяжение. Примеси солей и сахара, например.

Объяснение этому даёт МКТ. Если силы притяжения между молекулами самой жидкости больше сил притяжения между молекулами ПАВ и жидкости, то молекулы жидкости уходят внутрь из поверхностного слоя, а молекулы ПАВ вытесняются на поверхность. Очевидно, что молекулы соли и сахара будут втянуты в жидкость, а молекулы воды вытеснены на поверхность.

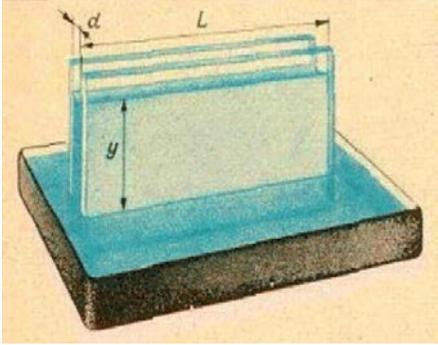
Таким образом, поверхностное натяжение – основное понятие физики и химии поверхностных явлений – представляет собой одну из наиболее важных характеристик и в практическом отношении. Следует отметить, что всякое серьёзное научное исследование в области физики гетерогенных систем требует измерения поверхностного натяжения.

История экспериментальных методов определения поверхностного натяжения, насчитывающая более двух столетий, прошла путь от простых и грубых способов до прецизионных методик, позволяющих находить поверхностное натяжение с точностью до сотых долей процента.

Интерес к этой проблеме особенно возрос в последние десятилетия в связи с выходом человека в космос, развитием промышленного строения, где капиллярные силы в различных устройствах часто играют определяющую роль.

Одним из таких методов определения поверхностного натяжения основан на поднятии смачивающей жидкости между двумя стеклянными пластинками. Их следует опустить в сосуд с водой и постепенно сближать параллельно друг другу. Вода начнёт подниматься между пластинками – её будет втягивать сила поверхностного натяжения, о которой сказано выше.

Легко рассчитать коэффициент поверхностного натяжения σ можно по высоте подъёма воды y и зазору между пластинками d . Сила поверхностного натяжения $F = 2\sigma L$, где L – длина пластинки (двойка появилась из-за того, что вода соприкасается с обеими пластинками). Эта сила удерживает слой воды массы $m = \rho Ldy$, где ρ – плотность воды. Таким образом,

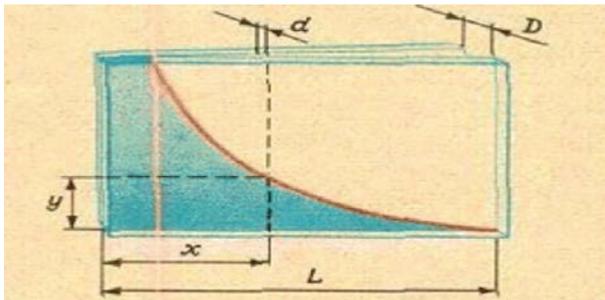


$$2\sigma L = \rho Ldyg.$$

Отсюда можно найти коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g d y. \tag{1}$$

Но интереснее сделать так: с одного конца сжать пластинки вместе, а с другого оставить небольшой зазор.



Вода поднимется и образует между пластинками удивительно правильную поверхность (важно, чтобы чисто было чистым и сухим).

Сечение этой поверхности вертикальной плоскостью – гипербола. Для доказательства достаточно в формулу (1) вместо d подставить новое выражение для зазора в данном месте. Из подобия соответствующих треугольников (см. рис. 2) $d = D \frac{x}{L}$. Здесь D – зазор на конце, L – по-прежнему длина пластинки, а x – расстояние от места соприкосновения пластинок до места, где определяется зазор и высота уровня.

Таким образом,

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g y D \frac{x}{L},$$

или

$$y = \frac{2\sigma L}{\rho g D} \cdot \frac{1}{x}. \tag{2}$$

Уравнение (2) действительно является уравнением гиперболы.

Смачивание и несмачивание

Для детального изучения капиллярных явлений следует рассмотреть и некоторые молекулярные явления, обнаруживающиеся на трёхфазной границе сосуществования твёрдой, жидкой, газообразной фаз, в частности рассматривается соприкосновение жидкости с твёрдым телом. Если силы сцепления между молекулами жидкости больше, чем между молекулами твёрдого тела, то жидкость стремится уменьшить границу (площадь) своего соприкосновения с твёрдым телом, по возможности отступая от него. Капля такой жидкости на горизонтальной поверхности твёрдого тела примет форму сплюснутого шара. В этом случае жидкость называется несмачивающей твёрдое тело. Угол θ , образованный поверхностью твёрдого тела и касательной к поверхности жидкости, называется краевым. Для несмачивающей $\theta > 90^\circ$. В этом случае твёрдая поверхность, несмачиваемая жидкостью называется гидрофобной, или олеофильной. Если же силы сцепления между молекулами жидкости меньше, чем между молекулами жидкости и твёрдого тела, то жидкость стремится увеличить границу соприкосновения с твёрдым телом. В этом случае жидкость называется смачивающей твёрдое тело; краевой угол $\theta < 90^\circ$. Поверхность же будет носить название гидрофильная. Случай, когда $\theta = 180^\circ$, называется полным несмачиванием. Однако это практически никогда не наблюдается, так как между молекулами жидкости и твёрдого тела всегда действуют силы притяжения. При $\theta = 0^\circ$ наблюдается полное смачивание: жидкость растекается по всей поверхности твёрдого тела. Полное смачивание или полное несмачивание являются крайними случаями. Между ними в зависимости от соотношения молекулярных сил промежуточное положение занимают переходные случаи неполного смачивания.

Смачиваемость и несмачиваемость – понятия относительные: жидкость, смачивающая одно твёрдое тело, может не смачивать другое тело. Например, вода смачивает стекло, но не смачивает парафин; ртуть не смачивает стекло, но смачивает медь.

Смачивание обычно трактуется как результат действия сил поверхностного натяжения. Пусть поверхностное натяжение на границе воздух – жидкость $\sigma_{1,2}$, на границе жидкость – твёрдое тело $\sigma_{1,3}$, на границе воздух – твёрдое тело $\sigma_{2,3}$.

На единицу длины периметра смачивания действуют три силы, численно равные $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{2,3}$, $\sigma_{1,3}$, направленные по касательной к соответствующим границам раздела. В случае равновесия все силы должны уравновешивать друг друга. Силы $\sigma_{2,3}$ и $\sigma_{1,3}$ действуют в плоскости поверхности твёрдого тела, сила $\sigma_{1,2}$ направлена к поверхности под углом θ .

Условие равновесия межфазных поверхностей имеет следующий вид:

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} \cos \theta$$

или

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}}$$

Величину $\cos \theta$ принято называть смачиванием и обозначать буквой B .

Определённое влияние на смачивание оказывает состояние поверхности. Смачиваемость резко меняется уже при наличии мономолекулярного слоя углеводородов. Последние же всегда присутствуют в атмосфере в достаточных количествах. Определённое влияние на смачивание оказывает и микрорельеф поверхности. Однако до настоящего времени пока не выявлена единая закономерность влияния шероховатости любой поверхности на смачивание её любой жидкостью. Например уравнение Венцеля-Дерягина

$$\cos \theta = x \cos \theta_0$$

связывает краевые углы жидкости на шероховатой (θ) и гладкой (θ_0) поверхностях с отношением x площади истинной поверхности шероховатого тела к её проекции на плоскость. Однако на практике это уравнение не всегда соблюдается. Так, согласно этому уравнению в случае смачивания ($\theta < 90$) шероховатость должна приводить к понижению краевого угла (т.е. к большей гидрофильности), а в случае $\theta > 90$ – к его увеличению (т.е. к большей гидрофобности). Исходя из этого и даются, как правило, сведения о влиянии шероховатости на смачивание.

По мнению многих авторов, скорость растекания жидкости на шероховатой поверхности ниже вследствие того, что жидкость при растекании испытывает задерживающее влияние встречающихся бугорков (гребней) шероховатостей.

Необходимо отметить, что именно скорость изменения диаметра пятна, образованного строго дозированной каплей жидкости, нанесённой на чистую

поверхность материала, используется в качестве основной характеристики смачивания в капиллярах. Её величина зависит как от поверхностных явлений, так и от вязкости жидкости, её плотности, летучести.

Очевидно, что более вязкая жидкость с прочими одинаковыми свойствами дольше растекается по поверхности и следовательно медленнее протекает по капиллярному каналу.

Капиллярные явления

Изучив подробно силы, лежащих в основе капиллярных явлений, стоит перейти непосредственно к капиллярам. Так, опытным путём можно пронаблюдать, что смачивающая жидкость (например, вода в стеклянной трубке) поднимается по капилляру. При этом, чем меньше радиус капилляра, тем на большую высоту поднимается в ней жидкость. Жидкость, не смачивающая стенки капилляра (например, ртуть с стеклянной трубке), опускается ниже уровня жидкости в широком сосуде. Так почему же смачивающая жидкость поднимается по капилляру, а несмачивающая опускается?

Не трудно заметить, что непосредственно у стенок сосуда поверхность жидкости несколько искривлена. Если молекулы жидкости, соприкасающиеся со стенкой сосуда, взаимодействуют с молекулами твёрдого тела сильнее, чем между собой, в этом случае жидкость стремится увеличить площадь соприкосновения с твёрдым телом (смачивающая жидкость) . При этом поверхность жидкости изгибается вниз и говорят, что она смачивает стенки сосуда, в котором находится.

Если же молекулы жидкости взаимодействуют между собой сильнее, чем с молекулами стенок сосуда, то жидкость стремится сократить площадь соприкосновения с твёрдым телом, её поверхность искривляется вверх. В этом случае говорят о несмачивании жидкостью стенок сосуда.

В узких трубочках, диаметр которых составляет доли миллиметра, искривлённые края жидкости охватывают весь поверхностный слой, и вся поверхность жидкости в таких трубочках имеет вид, напоминающий полусферу. Это так называемый мениск. Он может быть вогнутым, что наблюдается в случае смачивания, и выпуклым при несмачивании. Радиус

кривизны поверхности жидкости при этом того же порядка, что и радиус трубки. Явления смачивания и несмачивания в данном случае также характеризуется краевым углом θ между смоченной поверхностью капиллярной трубки и мениском в точках их соприкосновения.

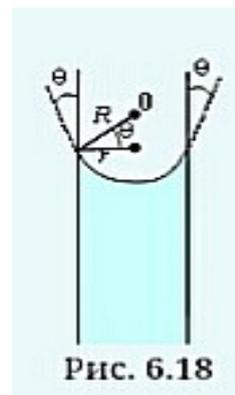


Рис. 6.18

Под вогнутым мениском смачивающей жидкости давление меньше, чем под плоской поверхностью. Поэтому жидкость в узкой трубке (капилляре) поднимается до тех пор, пока гидростатическое давление поднятой в капилляре жидкости на уровне плоской поверхности не скомпенсирует разность давлений. Под выпуклым мениском несмачивающей жидкости давление больше, чем под плоской поверхностью, и это ведёт к опусканию несмачивающей жидкости.

Наличие сил поверхностного натяжения и кривизны поверхности жидкости в капиллярной трубке ответственно за дополнительное давление под искривленной поверхностью, называемое давлением Лапласа: $\Delta p = \pm \frac{2\sigma}{R}$

Знак капиллярного давления («плюс» или «минус») зависит от знака кривизны. Центр кривизны выпуклой поверхности находится внутри соответствующей фазы. Выпуклые поверхности имеют положительную кривизну, вогнутые – отрицательную.

Так, условие равновесия жидкости в капиллярной трубке определяется равенством

$$p_0 = p_0 - \frac{2\sigma}{R} + \rho gh \quad (1)$$

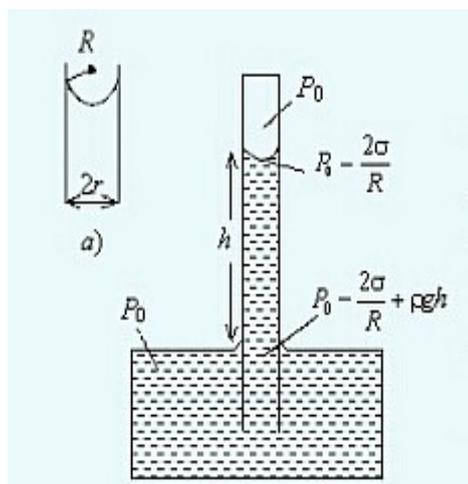
где ρ – плотность жидкости, h – высота её поднятия в трубке, p_0 – атмосферное давление.

Из данного выражения следует, что

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

Преобразуем полученную формулу, выразив радиус кривизны R мениска через радиус

капиллярной трубочки r .



Из рис. 6.18 следует, что

$$r = R \cos \theta$$

Подставляя (1) в (2), получаем: $h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$

Полученная формула, определяющая высоту поднятия жидкости в капиллярной трубке, носит название формулы Жюрена. Очевидно, что чем меньше радиус трубки, тем на большую высоту поднимается в ней жидкость. Кроме того, высота поднятия растёт с увеличением коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Подъём смачивающей жидкости по капилляру можно объяснить и по-другому. Как было сказано ранее, под действием сил поверхностного натяжения поверхность жидкости стремится сократиться. Вследствие этого поверхность вогнутого мениска стремится выпрямиться и сделаться плоской. При этом она тянет за собой частицы жидкости, лежащие под ней, и жидкость поднимается по капилляру вверх. Но поверхность жидкости в узкой трубке плоской оставаться не может, она должна иметь форму вогнутого мениска. Как только в новом положении данная поверхность примет форму мениска, она снова будет стремиться сократиться и т.д. В результате действия этих причин смачивающая жидкость и поднимается по капилляру. Поднятие прекратится, когда сила тяжести $F_{\text{тяж}}$ поднятого столба жидкости, которая тянет поверхность вниз, уравнивает равнодействующую силу F сил поверхностного натяжения, направленных касательно к каждой точке поверхности.

По окружности соприкосновения поверхности жидкости со стенкой капилляра действует сила поверхностного натяжения, равная произведению коэффициента поверхностного натяжения на длину окружности: $2\sigma \pi r$, где r – радиус капилляра.

Сила тяжести, действующая на поднятую жидкость,

$$F_{\text{тяж}} = mg = \rho V g = \rho \pi r^2 h g$$

где ρ – плотность жидкости; h – высота столба жидкости в капилляре; g – ускорение силы тяжести.

Подъём жидкости прекращается, когда $F_{\text{тяж}}=F$ или $\rho \pi r^2 h g = 2 \sigma \pi r$. Отсюда высота поднятия жидкости в капилляре

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

В случае несмачивающей жидкости последняя, стремясь сократить свою поверхность, будет опускаться вниз, выталкивая жидкость из капилляра. Выведенная формула применима и для несмачивающей жидкости. В этом случае h – высота опускания жидкости в капилляре.

Капиллярные явления в жизни

Явление капиллярности играет огромную роль в самых разнообразных процессах, происходящих в природе.

Так, если поступление питательных веществ в корневую систему растения регулируется процессом диффузии, то подъём питательного вещества по стеблю или стволу растения в значительной мере обусловлен явлением капиллярности: раствор поднимается по тонким капиллярным трубкам, образованными стенками растительных клеток.

Следует учитывать и капиллярность почвы, ведь она также пронизана множеством мелких каналов, по которым вода поднимается из глубинных слоёв почвы в поверхностные. Так, для того чтобы происходило более интенсивное испарение влаги из почвы, необходимо уплотнять её. В этом случае в почве образуются капилляры, и влага поднимается по ним вверх и испаряется. Наоборот, разрыхляя поверхность почвы и создавая тем самым прерывистость в системе почвенных капилляров, можно задержать приток воды к зоне испарения и замедлить высушивание почвы. Именно на этом основаны известные агротехнические приёмы регулирования водного режима почвы – прикатка и боронование.

По капиллярам кладки зданий происходит подъём грунтовой воды, избежать которого можно лишь проведя гидроизоляцию. По капиллярам фитиля поднимаются горючие и смазочные вещества; на капиллярности основано использование промокательной бумаги и т.п. И наконец, пчёлы извлекают нектар из глубин цветка посредством очень тонкой капиллярной трубки, находящейся внутри пчелиного хоботка.

Практическая часть

При изучении этой темы я обнаружила проблему, которую никто не поднимал - время подъёма жидкости в капиллярах, и мне стало интересно, от чего же оно зависит. Так, мною были поставлены цели и задачи для более подробного изучения явления капиллярности.

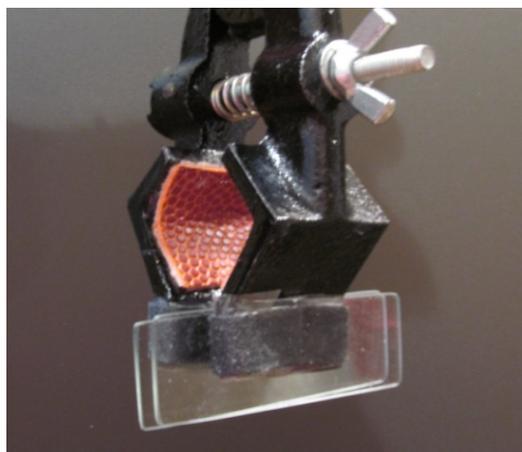
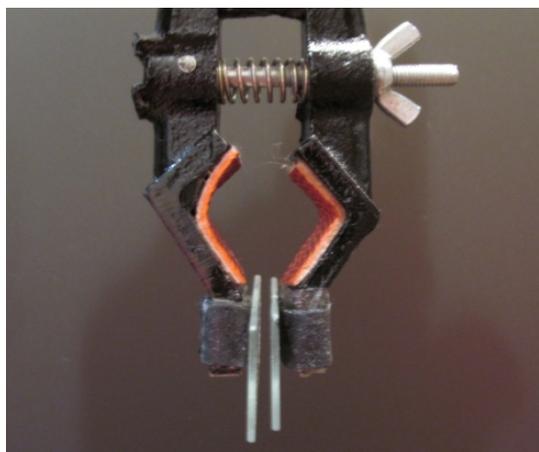
Цель: исследовать зависимость времени поднятия жидкости в капилляре от величины его радиуса;

Задачи:

- 1) Провести ряд экспериментов с поднятием жидкости по капиллярами различного вида;
- 2) С помощью метода размерности предположить формулу для времени поднятия жидкости в капиллярах;
- 3) Сравнить данные, полученные опытным путём со значениями, которые должны получиться теоретически;
- 4) Сделать вывод о применимости выведенной формулы.

Описание опыта

В связи с тем, что найти капиллярные трубки различного радиуса весьма проблематично, вместо них были взяты два стёклышка, прикреплённые строго параллельно друг к другу к тискам, для того чтобы с легкостью можно было менять расстояние между ними.



Измерение расстояния между стёклами происходило с помощью листов бумаги для принтера, толщина одного известна и равна 104×10^{-6} м.

Мною было проведено 5 опытов. Стёкла каждый раз опускались в воду, температура которой составляла 0°C , то есть жидкость имела постоянную плотность и коэффициент поверхностного натяжения ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma = 0,075 \text{ н/м}$).

Первый опыт был проведён, когда расстояние между стёклами было наибольшим ($d = 520 \times 10^{-6}$ м), при этом вода поднялась на высоту 1,6 см за 9 с. В дальнейших опытах я наблюдала поднятие воды именно до этой высоты. Полученные данные были занесены в таблицу:

№ опыта	d (м)	t (с)
1	520×10^{-6}	9
2	416×10^{-6}	7
3	312×10^{-6}	4
4	208×10^{-6}	2
5	104×10^{-6}	1

Вывод 1: из полученных результатов видно, что при увеличении расстояния между стёклышками увеличивается и время поднятия воды между ними.

Метод размерности

С помощью метода размерности мною была предположена формула для времени поднятия жидкости в капилляре.

$$t = k\rho^a \sigma^b d^c,$$

$$c^1 = \frac{\text{кг}^a}{\text{м}^{3a}} \times \frac{\text{н}^b}{\text{м}^b} \times \text{м}^c$$

$$c^1 = \frac{\text{кг}^a}{\text{м}^{3a}} \times \frac{\text{кг}^b}{\text{с}^{2b}} \times \frac{\text{м}^b}{\text{м}^b} \times \text{м}^c$$

$$(c) 1 = -2b$$

$$b = -\frac{1}{2}$$

$$(кг) a + b = 0$$

$$a - \frac{1}{2} = 0$$

$$a = \frac{1}{2}$$

$$(м) c - 3a = 0$$

$$c - 3 \times \frac{1}{2} = 0$$

$$c = \frac{3}{2}$$

Итак, $t = k\rho^{0,5} \sigma^{-0,5} d^{1,5}$

$$t = k \sqrt{\frac{\rho d^3}{\sigma}}, \text{ где}$$

t (с) – время поднятия жидкости между стёклышками;

ρ (кг/м³) – плотность жидкости;

d (м) – расстояние между стёклышками;

σ (н/м) – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

k - ?

Для определения значения коэффициента известные из каждого опыта данные были подставлены в формулу. Далее для всех пяти случаев было посчитано **k**.

№ опыта	d (м)	t (с)	k
1	520×10^{-6}	9	5111,06
2	416×10^{-6}	7	7142,92
3	312×10^{-6}	4	6284,14
4	208×10^{-6}	2	7215,44
5	104×10^{-6}	1	8163,34

Таким образом, было посчитано среднее значение **k**:

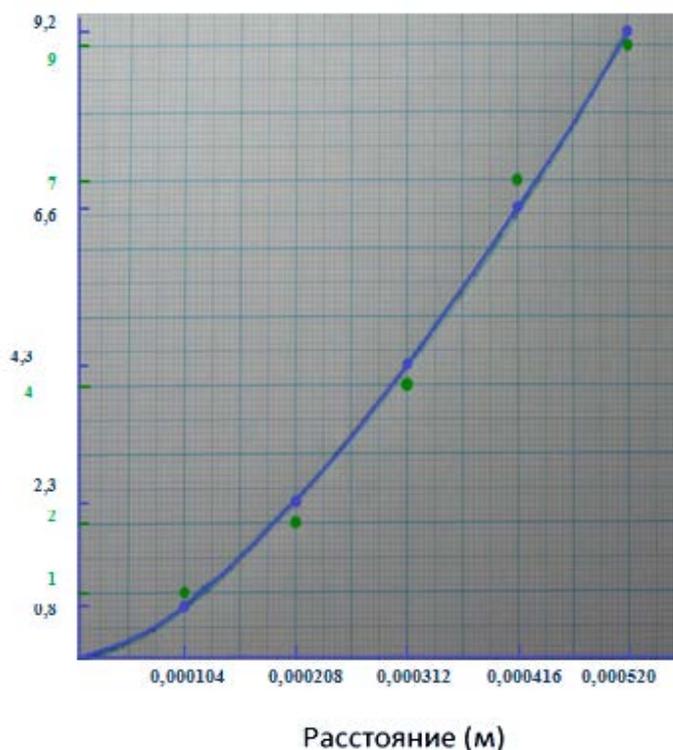
$$k \approx 6783,38$$

Затем по полученной ранее формуле $t = k \sqrt{\frac{\rho d^3}{\sigma}}$ был построен график зависимости времени от расстояния между стёклышками.

Синий график – функция, которая теоретически должна получиться при подставке всех данных в формулу. Зелёными точками отмечены данные, полученные мною экспериментальным путём (t).

Вывод 2: как можно увидеть, зелёные точки отклоняются от графика лишь на десятые доли, из чего можно сделать вывод, что выведенная мною формула применима для случая, когда нужно рассчитать время поднятия жидкости между стеклянными пластинами.

Время (с)



Следующей моей задачей было выяснить, возможно ли применять выведенную формулу для случая расчёта времени поднятия жидкости по капиллярам различных материалов, таких как хлопчатобумажная ткань, вата и бумажная салфетка, а также на их примере проверить, сохраняется ли прямая зависимость времени поднятия жидкости от величины радиуса капилляра.

Радиус капилляров каждого из этих материалов неизвестен, поэтому он был определён экспериментальным путём.

Из известной ранее формуле высоты поднятия жидкости в капиллярах была выражена формула для нахождения радиуса:

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

Так, мною был проведён ряд экспериментов, в ходе которых я измеряла время ($t_{\text{практическое}}$) поднятия жидкости в данных материалах на высоту (h), значение которой затем было подставлено в формулу для расчёта радиуса (R). При этом материалы каждый раз опускались в воду, температура которой составляла 0°C , то есть жидкость имела постоянную плотность и коэффициент поверхностного натяжения ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma = 0,075 \text{ н/м}$).

Далее, полученные значения радиусов были подставлены в формулу:

$t = k\sqrt{\frac{\rho d^3}{\sigma}}$, где $d=R$. В результате чего для каждого материала было рассчитано время поднятия жидкости ($t_{\text{теоретическое}}$).

Материал	h (м)	R (м)	t (с) _{практическое}	t (с) _{теоретическое}
Ткань	0,045	0,0003	5,6	4,07
Салфетка	0,03	0,0005	8,8	8,76
Вата	0,015	0,001	28	24,77

Вывод 3: из таблицы видно, что практическое время подъёма жидкости имеет приблизительное значение теоретического времени подъёма, рассчитанного с помощью выведенной формулы, а значит, эта формула применима и для случая поднятия жидкости по капиллярам пористых материалов.

Вывод 4: также из полученных результатов видно, что прямая зависимость времени поднятия жидкости от величины радиуса капилляра сохраняется и в телах, имеющих волокнистое строение, то есть чем больше радиус капилляров материала, тем больше время поднятия жидкости по ним.

Заключение

Таким образом, в процессе исследовательской работы мною был проведён ряд экспериментов, в ходе которых я выявила зависимость времени поднятия жидкости в капилляре от величины его радиуса.

Также мною была выведена формула, позволяющая рассчитывать время поднятия жидкости по капиллярам.

Применить в жизни эту формулу можно, например, для изготовления таймера, в котором за определенное время жидкость, поднимаясь по капилляру, доходит до определённого уровня, после чего срабатывает звонок.

Список литературы:

- 1) <http://worldofscience.ru/fizika/4523-kapillyarnye-yavleniya-v-prirode-i-tekhnike.htm>
- 2) http://ido.tsu.ru/schools/physmat/data/res/molek/uchpos/text/m6_09.htm
- 3) http://kvant.mccme.ru/1973/11/poverhnostnoe_natyazhenie_cher.htm
- 4) <http://www.medcoref.ru/mrefs-332-1.html>
- 5) Дж. Роулинсон, Б. Уидом. Молекулярная теория капиллярности, Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. - 376 с.
- 6) А. С. Боровиков, П. П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов. Физические основы дефектоскопии. - Минск: Наука и техника, 1983. - 256 с.
- 7) Мякишев Г.Я., Синяков А.З. Физика. Молекулярная физика. Термодинамика. 10 класс, 5-е изд., М.: Дрофа, 2002